

# ОБОРУДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,  
ДОПОЛНЕННОЕ И ПЕРЕРАБОТАННОЕ

Допущено  
Министерством высшего  
и среднего специального  
образования  
в качестве учебника  
для учащихся  
химико-технологических  
и химико-механических  
техникумов



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1978

ББК 34.7  
Г41  
УДК 66(075)

Рецензент: Т. М. Марина  
(Московский химико-технологический техникум)

- Генкин А. Э.  
Г41 Оборудование химических заводов: Учеб-  
ник для техникумов. — 3-е изд., перераб. и  
доп. — М.: Высш. школа, 1978. 272 с., ил.  
В пер.: 95 к.

В книге рассмотрены основные виды химической аппара-  
туры и деталей трубопроводов; приведены методы их конст-  
руирования и расчета; включен материал, касающийся новых  
и наиболее перспективных видов оборудования.

Предназначается для учащихся химико-технологических и  
химико-механических техникумов; может быть использован сту-  
дентами вузов в качестве вспомогательной литературы при кур-  
совом и дипломном проектировании, а также конструкторами,  
работающими в области химического машиностроения.

Г  $\frac{31402-228}{001(01)-78}$  218-78

6П7.1  
ББК 34.7

Август Эмануилович Генкин

#### ОБОРУДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ

Редактор В. И. Петухова. Переплет художника В. З. Казаке-  
вича. Художественный редактор Н. К. Гуторов. Технический  
редактор Н. В. Яшукова. Корректор Г. И. Кострикова

ИБ № 1072

Изд. № СТД-259. Сдано в набор 13.07.77. Подп. в пе-  
чать 20.03.78. Т-03659. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. тип. № 2. Гарнитура  
литературная. Печать высокая. Объем 17 усл. печ. л.  
17,7 уч.-изд. л. Тираж 20 000 экз. Зак. № 3096. Цена 95 коп.

Издательство «Высшая школа»,  
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
Хохловский пер., 7.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном, третьем, издании книги (второе издание вышло в 1970 г.) значительное внимание уделено современным типам химической аппаратуры, в связи с чем расширены параграфы, описывающие аппараты с псевдооживленным слоем, колонные аппараты интенсивного действия и введена дополнительная глава «Пульсационная и ультразвуковая аппаратура». Весь материал учебника существенно переработан с учетом современных нормативных материалов химического машиностроения. Изменена структура второй части; материал в ней изложен не по видам химических производств, а по основным типам реакционного оборудования.

Учебник составлен в соответствии с программой курса «Оборудование химических заводов», утвержденной в 1974 г. Учебно-методическим управлением по средним специальным учебным заведениям Министерства высшего и среднего специального образования.

Автор выражает благодарность рецензенту Т. М. Мариной и всем лицам, приславшим замечания по второму изданию книги.

Все замечания по книге направлять по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

*Автор*

Широкая программа развития народного хозяйства, намеченная на XXV съезде КПСС, предусматривает значительное увеличение выпуска химических продуктов, в первую очередь минеральных удобрений и полимерных материалов. Для ускоренного роста химической промышленности важное значение имеет производство и непрерывное совершенствование химического машиностроения, развитие которого опирается, с одной стороны, на теоретические и экспериментальные исследования химических и физико-химических процессов, а с другой — на достижения в области машиностроения, металлургии и техники сварки. Теоретические исследования, многочисленные экспериментальные работы и опыт, накопленный в промышленности, позволили разработать высокоинтенсивные процессы и совершенные конструкции химических аппаратов. Важное значение в деле совершенствования химического оборудования имели работы советских ученых: М. В. Кирпичева, И. А. Тищенко, А. Г. Касаткина, В. В. Кафарова, Н. И. Гельперина, А. Н. Плановского и П. Г. Романкова.

Химическая промышленность в настоящее время имеет высокопроизводительные, полностью механизированные и автоматизированные производства. Современное химическое производство — это сложный комплекс машин и оборудования, основными из которых являются: аппараты и машины химического производства, предназначенные для химических и физико-химических процессов; емкостное оборудование для хранения жидкостей и газов; трубопроводы; машины для перемещения жидкостей и газов; машины для транспортирования твердых материалов, расфасовки и затаривания сыпучих продуктов; КИП и автоматика; электрооборудование.

Несмотря на то что все виды оборудования имеют важное значение, основными из них считаются химические аппараты и машины, при конструировании и изготовлении которых руководствуются следующими основными принципами:

1. Максимально интенсифицировать технологические процессы, что достигается за счет развития рабочей поверхности, поверхности теплообмена, фильтрации, контакта фаз и др., а также за счет интенсификации тепло- и массообмена. Большое значение имеет разработка процессов на принципиально новой физико-химической

основе, позволяющих в некоторых случаях в десятки и сотни раз увеличить производительность и организовать процесс принципиально по-новому. В настоящее время осваиваются процессы с применением ультразвуковой и вибрационной техники и низкотемпературной плазмы.

2. Увеличивать размеры аппаратов в тех случаях, когда возможности интенсификации процесса исчерпаны.

Аппараты больших размеров выгоднее, так как занимают меньшую производственную площадь и менее металлоемки, чем несколько малых, и требуют меньше обслуживающего персонала. Увеличение габаритов аппаратов ограничивается возможностью удовлетворительного перемешивания или газораспределения в большом объеме, а также возможностями изготовления и транспортирования крупногабаритной аппаратуры. В последнее время эксплуатируются реакционные аппараты и ректификационные колонны высотой до 90 м и диаметром до 16 м, емкостные реакционные аппараты объемом до 100 м<sup>3</sup>, а иногда и более, вращающиеся печи длиной до 150 м и другие крупногабаритные аппараты.

3. Повышать надежность машин и аппаратов химического производства, так как аварийная остановка современной высокопроизводительной технологической системы иногда приносит убытки, превышающие стоимость самого оборудования. Частые причины выхода из строя машин и аппаратов химического производства — коррозия и повреждение наиболее ответственных узлов, особенно узлов уплотнения.

Конструкция аппаратов и машин химического производства определяется их технологическим назначением, агрегатным состоянием реагирующих веществ и способом проведения процесса (периодическим или непрерывным).

В технологических аппаратах возможны следующие фазовые системы: *газ + газ, газ + жидкость, жидкость + жидкость, жидкость + твердое вещество, газ + твердое вещество, твердое вещество + твердое вещество* (рис. 1).

В системе I (газ + газ) проводят высокотемпературные химические процессы, для которых применяют змеевиковые 2 и контактные аппараты 1 и конверторы различных систем, а также процессы газоочистки, для которых используют газоочистительные аппараты 3. В системе II (газ + жидкость) производят ректификацию, абсорбцию, мокрую газоочистку, а также многие химические реакции. При этом применяют колонные 4 и башенные аппараты с устройствами, обеспечивающими хороший контакт между жидкостью и газом. Для газов, хорошо растворимых в жидкости, когда достаточна небольшая поверхность контакта, процесс проводят в простейших аппаратах барботажного типа 5 или в поверхностных абсорберах 6. В системе III (жидкость + жидкость) осуществляют физико-химические и разнообразные химические процессы. Для этого применяют емкостные аппараты с мешалками 7 или без них и аппараты змеевикового типа 8. Для обработки взаимно нерастворимых жидкостей с различным удельным весом иногда ис-

пользуют аппараты колонного типа с противоточным движением жидкостей. Сепарацию проводят в сепараторах центробежного типа 9.

Химические и физико-химические процессы в системе IV (жидкость + твердое вещество) осуществляют в емкостных аппаратах с мешалками 10 или в проточных камерах 11 и 12, заполненных твердым продуктом. Фильтрация, отстаивание, центрифугирование производят соответственно в фильтрах, отстойниках и центрифугах.

В фазовой системе V (газ + твердое вещество) проводят газоочистку, сушку, адсорбцию, а также ряд химических процессов, в основном высокотемпературных. Простейший аппарат для сушки, обжига или химического взаимодействия — камера, заполненная

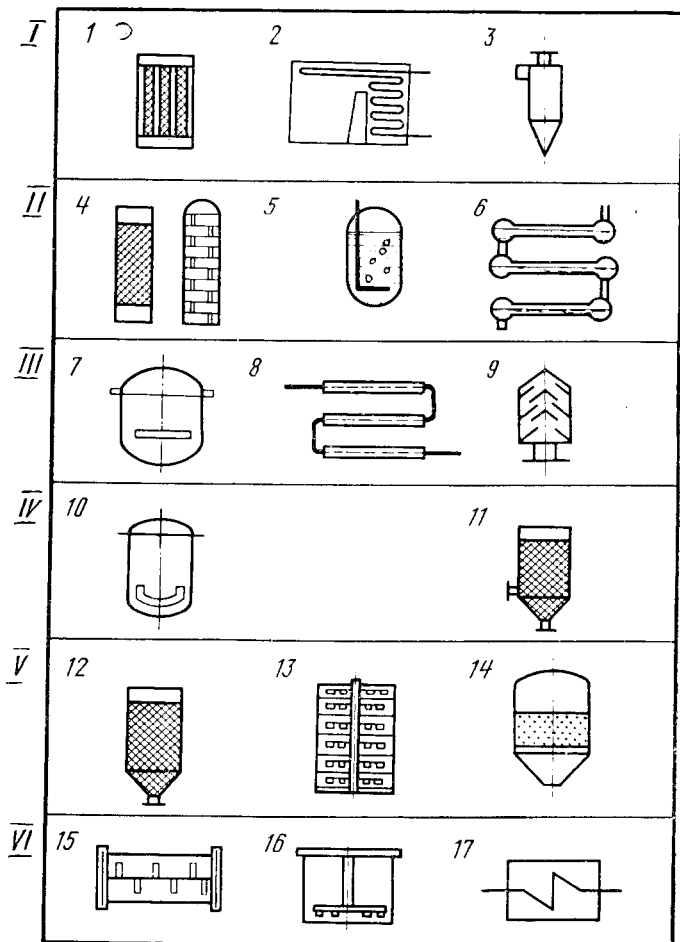


Рис. 1. Типы химических аппаратов. Агрегатное состояние вещества

твердым продуктом 12, омываемым потоком газа. Для интенсификации процесса применяют аппараты гребкового типа 13 и 16, в виде вращающихся барабанов и с псевдооживленным слоем 14.

Систему VI (твердое вещество + твердое вещество) в химической технологии применяют сравнительно редко. Для обработки твердых продуктов используют аппараты гребкового типа 15 и 16, валковые, червячные смесители и пластификаторы 17 и др.

Периодический или непрерывный способ проведения процесса существенно влияет на конструкцию аппарата, так как определяет конфигурацию, способ загрузки и разгрузки компонентов и другие конструктивные особенности.

В заключение следует отметить, что деление химического оборудования на машины и аппараты условно.

К химическим машинам обычно относят оборудование, в котором значительный удельный вес занимают механические узлы: центрифуги, сепараторы и оборудование цехов пластмасс и резины.

## ОСНОВНЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### ГЛАВА 1

#### ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА КОНСТРУИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И МАШИН

##### **§ 1.1. Основные требования, предъявляемые к химическому оборудованию**

Первоначальное требование, которому должны удовлетворять химические машины и аппараты, — это обеспечение наиболее высоких технологических параметров, что достигается способами, кратко описанными во введении. Наряду с технологическим совершенством химическое оборудование должно удовлетворять ряду требований механического характера, поэтому конструкция аппарата или машины существенно зависит от параметров процесса (давления и температуры), коррозионных свойств среды, наличия осадков и отложений, свойств конструкционных материалов и др.

Конструирование аппарата начинают с выбора его устройства, определения формы и основных размеров. Размеры аппарата определяют с помощью технологических, массообменных, тепловых и гидравлических расчетов, которые дают основные рабочие параметры: рабочий объем, размеры рабочих элементов машин, поверхности теплообмена, фильтрации и контакта фаз и др. Результаты расчетов взаимно увязывают и корректируют. Если приходится учитывать различные противоречивые факторы, находят оптимальные варианты.

Форма аппарата или машины определяется их технологическим назначением и конструкцией рабочих элементов, в значительной степени зависящей от гидродинамики процесса. Существенное влияние на форму аппарата оказывают свойства конструкционных материалов и возможности машиностроения. Например, при конструировании кожухотрубных теплообменников, чтобы улучшить коэффициент теплопередачи, стремятся увеличить скорость теплоагентов, это влечет за собой рост длины аппарата. По конструктивным соображениям теплообменники обычно изготавливают длиной не более 9 м, что наряду с ростом гидравлического сопротивления накладывает определенные ограничения на величину скорости. Аналогичные задачи приходится решать и при конструировании других видов оборудования.

Аппараты высокого давления, например, делают малого диаметра и большой длины, чтобы уменьшить толщину стенки. В связи с увеличением размеров аппаратов и машин большое значение

приобрела проблема равномерного распределения потоков по сечению аппарата. Поток вводится в аппараты через штуцера, размеры которых невелики по сравнению с диаметром аппарата, поэтому как при центральном, так и при боковом расположении вводного штуцера возникает значительная неравномерность в распределении потока. Чтобы устранить ее, не прибегая к плавным переходам большой длины, применяют одно из устройств, изображенных на рис. 2. Следует отметить, что указанные распределительные устройства требуют тщательного гидравлического расчета, так как при неправильной конструкции они могут даже увеличить неравно-

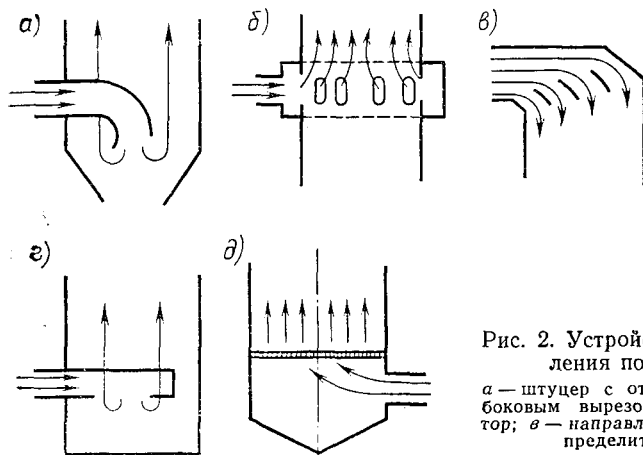


Рис. 2. Устройство для перераспределения потока в аппарате:

а — штуцер с отводом вниз; б — труба с боковым вырезом; в — кольцевой коллектор; г — направляющие лопатки; д — распределительные решетки

мерность потока (подробный расчет указанных устройств приведен в [32]).

В аппаратах следует избегать застойных зон, ухудшающих технологические характеристики аппарата, затрудняющих его очистку и способствующих образованию отложений. Всякого рода закрытые полости внутри аппарата, недоступные очистке и промывке, также нежелательны, особенно при работе с ядовитыми, огне- и взрывоопасными веществами.

Химические аппараты делают, как правило, цилиндрической формы, так как она удобна при работе под давлением и лучше обеспечивает герметичность аппарата. Аппараты прямоугольной формы применяют сравнительно редко. Наибольшее распространение получило вертикальное расположение аппаратов, однако в промышленности эксплуатируется весьма значительное количество горизонтально расположенной аппаратуры.

Для присоединения трубопроводов, контрольно-измерительных приборов и внутреннего осмотра и ремонта аппаратов предусматривают штуцера, бобышки, смотровые окна и люки. Диаметры основных технологических штуцеров определяют гидравлическим расчетом, но в любом случае они не должны быть очень малыми.

Желательно, чтобы штуцера на одном аппарате были по возможности одинаковы по диаметру. Наряду со штуцерами для ввода и вывода продуктов устанавливают ряд штуцеров, необходимых для эксплуатации аппарата: для промывки и продувки инертным газом или паром, подачи сжатого воздуха, установки предохранительных клапанов и других целей. Обычно непосредственно на штуцера устанавливают трубопроводную арматуру.

При расстановке штуцеров, люков и смотровых окон необходимо обеспечить удобства и безопасность их обслуживания. Штуцера не должны быть расположены слишком тесно, необходимо, чтобы к каждому разъемному соединению и к арматуре был удобный доступ. Не допускается обслуживание люков и трубопроводной арматуры с каких-либо стремянок и временных мостиков.

К аппаратам, устанавливаемым под открытым небом, предъявляется ряд специальных требований. Например, при водяном охлаждении должен быть предусмотрен быстрый слив воды при остановке аппарата.

Люки и лазы служат для осмотра и ремонта аппарата, а в некоторых случаях — для загрузки твердых продуктов. Для внутреннего осмотра аппаратов необходимы круглые лазы диаметром не менее 400 мм или овальные с минимальным сечением  $400 \times 325$  мм. Для аппаратов, установленных под открытым небом, диаметр лаза должен быть не менее 450 мм, чтобы в него мог пролезть человек в зимней одежде. При малых размерах аппарата или машины для осмотра и доступа в аппарат снаружи делают люки. При решении вопроса о возможности доступа к отдельным частям аппарата через люк необходимо учитывать, что длина руки человека не более 800 мм. Диаметр люка (или штуцера), который предполагают использовать для данных целей, должен быть не менее 80 мм.

Следует отметить, что удобный доступ к наиболее ответственным и уязвимым узлам аппарата или машины, удобство их замены и ремонта — один из показателей конструктивного совершенства изделия. Если устройство лазов и люков для данных целей недостаточно, делают съемные крышки или аппарат собирают из отдельных царг. На рис. 3 показаны три варианта конструкции колонных аппаратов. В первом случае (а) разбирают и осматривают внутренние элементы колонны через люки (колонны большего диаметра), во втором случае (б) колонну малого диаметра собирают из отдельных царг и, наконец, возможен вариант (в), когда все внутреннее устройство целиком вынимают через верх колонны. Лишние разъемы в принципе нежелательны, так как они усложняют и удорожают конструкцию аппарата и ухудшают его герметичность. Крайне нежелательны разъемы при высоком давлении, поэтому конструкцию с вынимающейся насадкой, изображенную на рис. 3, в, применяют для аппаратов высокого давления. Особенно необходим удобный доступ к сложным механическим узлам. Наиболее удобна конструкция, когда узлы можно целиком вынуть из аппарата.

Необходимо учитывать, что резьбовые соединения внутри аппаратов и машин химической промышленности, подвергающиеся воздействию продуктов, отвертываются с большим трудом вследствие коррозии и отложения осадков, поэтому принимают специальные меры — защищают резьбу колпачками или делают крепежные детали из кислотостойкой стали, даже если среда некоррозионная.

После определения конструкции и основных размеров приступают к выбору материала и детальной проработке элементов конструкции. При конструктивной проработке учитывают прочность, герметичность и надежность конструкции.

Машины и аппараты химического производства обычно работают в тяжелых условиях, подвергаются действию высоких температур и коррозии и содержат ядовитые, горючие и взрывоопасные вещества; поэтому при их расчете применяют запасы прочности более высокие, чем в общем машиностроении. В некоторых случаях решающий фактор — жесткость конструкции. Повышенную жесткость, например, должны иметь аппараты, защищенные футеровкой или кислотостойкой эмалью. Практически ко всем аппаратам химического производства и машинам предъявляются требования по части герметичности, но особенно высоки эти требования при работе с сильно действующими ядовитыми и летучими веществами, а также для аппаратов, работающих под глубоким вакуумом. Герметичности достигают за счет повышенных требований к качеству сварных швов, уменьшения числа разъемных соединений и улучшения их плотности. Наиболее трудно уплотнить подвижные соединения, например вращающиеся валы или штоки компрессоров.

Увеличение производительности и широкое внедрение автоматизации предъявляют повышенные требования к надежности машин и аппаратов. Расчетный срок службы аппаратов 10÷12 лет. Если в производстве отсутствует значительная коррозия, то аппараты служат дольше указанного срока, если же в производстве значительны влияние коррозии и действие высоких температур, то аппараты служат короткий период, что недопустимо. Долговечность и надежность аппаратуры повышается за счет использования материалов, устойчивых к коррозии и действию высоких температур, применения безотказно работающих узлов и механизмов

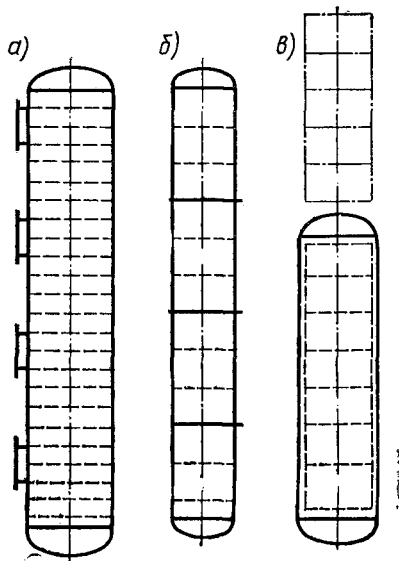


Рис. 3. Варианты конструкции колонных аппаратов

и контроля за состоянием стенок аппарата, сварных швов и антикоррозионных покрытий. Корпус аппарата служит обычно значительно дольше, чем различные внутренние устройства, которые периодически меняют во время ремонтов. В настоящее время наблюдается тенденция так подбирать конструкционные материалы различных узлов и деталей одного аппарата, чтобы срок службы был примерно одинаков.

Весьма важный фактор — экономичность оборудования. Стои-

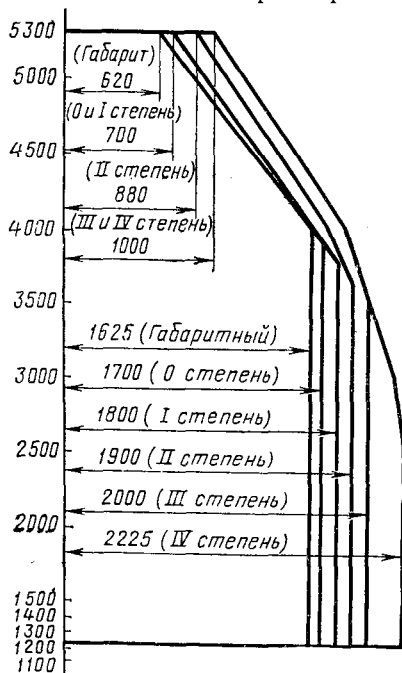


Рис. 4. Железнодорожные габариты

мость складывается из затрат на изготовление и материалы. При использовании высоконикелевых кислотостойких сплавов или титана стоимость конструкционных материалов может быть велика. Поэтому чтобы уменьшить расход дорогих и дефицитных металлов и сплавов, их заменяют по возможности углеродистой сталью с неметаллическими антикоррозионными покрытиями или биметаллами (двухслойной сталью со сравнительно тонким слоем кислотостойкой стали). Для уменьшения стоимости изготовления стремятся сделать изделие менее трудоемким. Одним из критериев стоимости изготовления является коэффициент стандартизации, учитывающий удельный вес стандартных узлов и деталей в данном изделии,

$$k = (E_1 + E_2 + E_3) / \Sigma E, \quad (1)$$

где  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  — масса стандартных и нормализованных узлов и деталей, покупных деталей, унифицированных узлов и деталей;  $\Sigma E$  — общая масса изделия.

Наряду с увеличением коэффициента стандартизации стремятся литые и кованые изделия по возможности заменять более дешевыми сварными и упрощать конфигурацию изделий.

При разработке конструкции машины или аппарата важное значение имеют вопросы их перевозки. Аппараты массой до 60 т, диаметром до 3200 мм и длиной менее 21 м свободно перевозятся по железной дороге (рис. 4). После специального согласования железнодорожным транспортом может быть перевезено более тяжелое и громоздкое негабаритное оборудование. Однако перевозка по железной дороге оборудования диаметром свыше 3800 мм и массой более 120 т связана с большими трудностями, требует специальных транспортеров и приспособлений, кроме того, не все железнодо-

ржные маршруты допускают перевозку таких изделий. Более громоздкое оборудование, которое не вписывается в наибольшую, четвертую, степень негабаритности, является сверхнегабаритным и не может быть перевезено железнодорожным транспортом. Водным транспортом перевозят аппараты диаметром до 8 м и длиной до 55 м, а с буксировкой на плаву — диаметром до 10 м и длиной до 100 м. Крупногабаритное оборудование перевозят на специальных прицепах по шоссе на дорогах после соответствующей проверки маршрута. Оборудование, которое нельзя перевезти целиком, поставляют транспортабельными блоками наибольших размеров. Негабаритное изделие обязательно контролируют при сборке на заводе-изготовителе, поэтому блоки должны иметь маркировку, облегчающую их монтаж. Если отдельные блоки соединяют на монтаже сваркой, то должны быть предусмотрены различные стяжные приспособления, облегчающие соединение кромок перед сваркой.

За последнее время начали применять способы перевозки цилиндрических обечаек большого диаметра методом рулонирования или частичной деформации. Рулонирование заключается в том, что обечайка сваривается на заводе-изготовителе в виде полотнища и сворачивается в рулон, который затем разворачивают на монтажной площадке. При методе частичной деформации обечайка, разрезанная по образующей, сворачивается, насколько позволяет упругая деформация, благодаря чему диаметр ее уменьшается до габаритных размеров. Требования к химическому оборудованию регламентируются рядом нормативных документов, основными из которых являются следующие: 1) правила Госгортехнадзора по устройству и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением [23]; 2) ОСТ 26-291—71; 3) правила техники безопасности для проектирования и эксплуатации взрыво- и пожароопасных производств в химической и нефтехимической промышленности\*.

Указанные документы определяют основные требования к конструкции, изготовлению аппаратов и к конструкционным материалам, а также определяют виды испытания оборудования.

Правила Госгортехнадзора распространяются на сосуды и аппараты, работающие под давлением свыше  $0,07 \text{ Н/мм}^2$ , за исключением сосудов: 1) емкостью менее 25 л, у которых производство объема в литрах на давление в атмосферах не превышает 200; 2) заполненных водой и другими неядовитыми и невзрывоопасными жидкостями при температуре, не превышающей их точки кипения, соответствующей давлению  $0,07 \text{ Н/мм}^2$ ; 3) состоящих из труб диаметром до 100 мм, а также из труб с коллекторами диаметром до 150 мм.

Правила Госгортехнадзора предусматривают в обязательном порядке лазы для внутреннего осмотра аппаратов диаметром более 800 мм (при наличии съемных крышек устройство лазов не

---

\* Правила и нормы техники безопасности и промышленной санитарии для проектирования и эксплуатации пожаро- и взрывоопасных производств химической и нефтехимической промышленности. «Недра», 1967.

обязательно). В правилах указывается также, что все устройства (мешалки, перегородки и др.), мешающие внутреннему осмотру, должны быть съемными.

На аппараты, подведомственные Госгортехнадзору, оформляется специальный паспорт.

## § 1.2. Материалы химического машиностроения и способы изготовления аппаратуры

Конструкционные материалы выбирают в зависимости от температуры, давления и коррозионного действия среды. Необходимо также учитывать стоимость и технологические свойства материала, т. е. возможность и простоту изготовления из него изделий заданной формы.

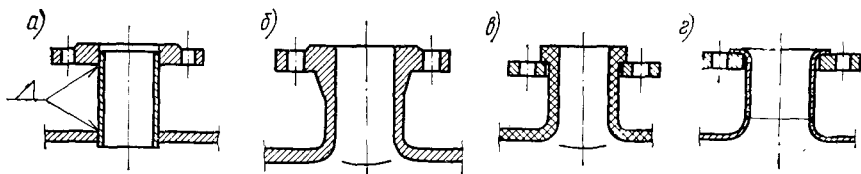


Рис. 5. Штуцера из различных конструкционных материалов:

*а* — стальной сварной; *б* — чугунный; *в* — керамический штуцер со свободным разъемным фланцем; *г* — алюминиевый штуцер со свободным фланцем

Конструкция и способы изготовления аппаратов в значительной степени определяются свойствами конструкционных материалов. Как видно на рис. 5, одни и те же конструктивные элементы, изготовленные из разных материалов, существенно отличаются друг от друга. В химическом машиностроении применяют углеродистые и легированные стали, чугуны, цветные металлы и неметаллические материалы органического и неорганического происхождения.

**Стальные сварные аппараты.** В настоящее время широко используют сварные аппараты из углеродистой и легированной стали. Для изготовления сосудов и аппаратов применяют углеродистую сталь обыкновенного качества по ГОСТ 380—71 (широко применяют Ст3) и котельную сталь марок 15К; 18К; 20К, обладающую повышенными механическими свойствами. За последнее время широко используют углеродистые стали 09Г2С, 16ГС, легированные марганцем.

Углеродистую сталь обыкновенного качества применяют для сосудов и аппаратов, работающих при давлении до 5 Н/мм<sup>2</sup>, для котельных и марганцовистых сталей рабочее давление не ограничено. Углеродистые стали в зависимости от способа выплавки подразделяют на кипящие, спокойные и полуспокойные. Кипящая сталь содержит больше вредных примесей, считается продуктом пониженного качества, ее применение ограничено (для сосудов и аппаратов, работающих под давлением не более 1,6 Н/мм<sup>2</sup>). Преде-

Таблица 1

| Рабочее давление,<br>Н/мм <sup>2</sup> , не более | Температура<br>стенки, °С | Условия применения                                                                  | Марка стали             |
|---------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Без давления                                      | $-30 \div +550$           | Для ненагруженных внутренних устройств и других неотчетственных конструкций         | ВСт3кп2                 |
| То же                                             | $-30 \div +350$           | Для емкостных аппаратов до 100 м <sup>3</sup>                                       | ВСт3кп2                 |
| »                                                 | $-40 \div +350$           | То же                                                                               | ВСт3пс3; ВСт3сп3        |
| »                                                 | $-40 \div +350$           | Для резервуаров емкостью свыше 100 м <sup>3</sup>                                   | ВСт3пс4; ВСт3сп4        |
| 0,07                                              | $-15 \div +350$           | Для корпусов, днищ и фланцев аппаратов, не имеющих внутренней жароупорной футеровки | ВСт3кп2                 |
| 5,0                                               | $0 \div +200$             | Для корпусов, днищ, фланцев и др.                                                   | ВСт3пс3; ВСт3сп3        |
| 5,0                                               | $-20 \div +425$           | То же                                                                               | ВСт3пс5; ВСт3сп5        |
| Не ограничено                                     | $-20 \div +475$           | Для корпусов, днищ, фланцев и др.                                                   | 15К; 16К; 18К; 20К      |
| То же                                             | $-70 \div +475$           | Для корпусов, днищ, фланцев, трубных решеток и др.                                  | 09Г2С                   |
| »                                                 | $-40 \div +540$           | Для корпусов, днищ, фланцев, трубных решеток и др.                                  | 12ХМ                    |
| »                                                 | $-40 \div +300$           | Для корпусов, днищ, фланцев и др.                                                   | 08Х22Н6Т                |
| »                                                 | $-253 \div +610$          | Для корпусов, днищ, фланцев, трубных решеток и др.                                  | 12Х18Н10Т;<br>08Х18Н10Т |
| Без давления                                      | До 700                    | Для деталей, не подлежащих контролю Госгортехнадзора                                | 08Х18Н10Т;<br>12Х18Н10Т |
| Не ограничено                                     | $-253 \div +700$          | Для корпусов, днищ, фланцев и др.                                                   | 10Х17Н13М2Т             |
| То же                                             | $-196 \div +600$          | То же                                                                               | 16Х17Н13М3Т             |
| Без давления                                      | $+20 \div +1000$          | Для деталей, не подлежащих контролю Госгортехнадзора                                | 15Х25Т                  |

лы применения углеродистых и легированных сталей определяются ОСТ 26-291—71 (табл. 1).

В криогенной технике и при установке аппаратов под открытым небом в районах, где бывают сильные морозы, имеет значение нижний температурный предел материала. Механические свойства углеродистых сталей ухудшаются при низких температурах вследствие снижения ударной вязкости. Углеродистые стали обыкновенного качества и котельные применяют при температуре не ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ , марганцовистые стали — до  $-70^{\circ}\text{C}$ ; при более низких температурах — хромоникелевые стали. Верхний температурный пре-

дел применения углеродистых и марганцовистых сталей не превышает 475° С. При более высокой температуре резко падает их механическая прочность и появляются признаки ползучести.

При высокой температуре, а также при действии корродирующих сред применяют высоколегированные стали и сплавы. В зависимости от свойств их подразделяют на: 1) коррозионностойкие (не-ржавеющие) стали, обладающие стойкостью против электрохимической и химической коррозии; 2) жаростойкие (окалиностойкие), обладающие стойкостью против газовой коррозии при температурах выше 550° С; 3) жаропрочные стали и сплавы, способные работать в нагруженном состоянии при высоких температурах и обладающие при этом достаточной жаростойкостью. Одна и та же марка стали может быть одновременно коррозионностойкой, жаропрочной и жаростойкой.

Сталь 15Х5М, содержащая сравнительно небольшой процент легирующих элементов, при температуре до 600° С сохраняет высокую прочность, т. е. является жаропрочной. При более высоких температурах и наличии коррозии применяют стали с повышенным содержанием никеля. Из многочисленных марок высоколегированных сталей наиболее распространены 12Х18Н10Т и 08Х18Н10Т, последняя имеет пониженное содержание углерода и соответственно более высокую химическую стойкость. Эти стали применяют в температурном интервале от —253° до +600° С, а при отсутствии давления — до 700° С.

В связи с тем что никель очень дефицитен, применяют стали с пониженным содержанием никеля (08Х22Н6Т и 12Х21Н5Т), которые в малоагрессивных средах являются полноценными заменителями приведенных выше марок. Еще более коррозионностойки хромоникель-молибденовые стали 10Х17Н13М2Т и 10Х17Н13М3Т.

Хромистые стали 15Х25Т и 15Х28 стойки во многих корродирующих средах и термостойки, они более дешевы по сравнению с хромоникелевыми, однако плохо свариваются, так как сварные швы требуют специальной обработки, поэтому их применяют для аппаратов, работающих без давления, и в различных неотвественных узлах аппаратуры.

В особо тяжелых условиях работы применяют стали и сплавы с более высоким содержанием легирующих элементов. В качестве примера можно привести сплав 03ХН28МДТ, устойчивый в серной кислоте любой концентрации и во многих других коррозионных средах. Никель-молибденовый сплав Н70МФ (сплав типа «хастеллой») устойчив во многих агрессивных средах, в том числе в горячей соляной кислоте, что делает его чрезвычайно ценным материалом химического машиностроения. Широкое внедрение данных сплавов ограничивается высокой стоимостью исходных металлов, поэтому их применяют для изготовления особо ответственных узлов аппаратов.

В целях экономии дефицитных легированных сталей используют листовой прокат (биметаллический лист), состоящий из двух гомогенно соединенных слоев — толстого основного из углеродистой

стали и тонкого плакирующего из легированной стали. Толщину основного слоя выбирают по условиям прочности, толщину плакирующего слоя — не менее 2 мм (в толстостенных аппаратах обычно не менее 5—6 мм). Максимальная температура для биметалла 450° С; при более высокой температуре возможно расслоение листов. Более прочное соединение слоев биметалла обеспечивается методом взрыва. Для сильно корродирующих средств редко применяют двухслойные стали, так как при сварке биметаллических листов возможно смещение кромок, вследствие чего ухудшается коррозионная стойкость сварного соединения.

При сварке сосудов и аппаратов делают стыковые швы, как наиболее надежные и доступные контролю. Соединения втавр и угловые швы применяют для приварки фланцев, трубных решеток и других аналогичных элементов. Сварку внахлест используют только при изготовлении больших резервуаров. Более предпочтителен двусторонний сварной шов, который и следует применять во всех случаях, когда внутренняя поверхность стенки доступна для сварки.

Конструкция аппарата должна обеспечивать удобный доступ к сварным швам. Это особенно важно, если швы подвергаются межкристаллитной или ножевой коррозии. Сварные соединения корпуса не должны быть перекрыты опорами, косынками и другими приварными элементами. Продольные швы на горизонтальных аппаратах не следует располагать в нижней части корпуса, если она труднодоступна для осмотра; они должны быть смещены не менее чем на 100 мм (рис. 6). Перекрытие сварных швов не допускается.

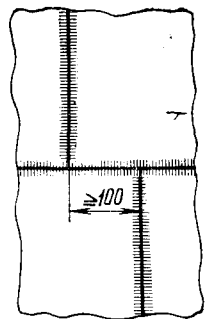


Рис. 6. Расположение сварных швов на обечайке аппарата

При сварке элементов разной толщины необходимо предусмотреть плавный переход от одного элемента к другому, угол скоса — не более 15°. Можно применять стыковые соединения без утонения более толстой кромки, если разность в толщинах соединяемых элементов не превышает 30% от толщины более тонкого элемента. Располагать отверстия на сварных швах не рекомендуется. При сварке аппаратов из кислотостойких сталей, работающих в средах, вызывающих межкристаллитную коррозию, необходимо предусматривать проверку сварных швов на стойкость к ней. Возможна сварка углеродистых сталей с кислотостойкими. Шов получается достаточно прочным, однако вблизи сварного шва коррозионная стойкость кислотостойкой стали может быть снижена из-за диффузии легирующих элементов и изменения структуры металла. Поэтому такой сварной шов следует по возможности относить от стенки аппарата (особенно это важно при малой толщине стенки). Например, лапы из углеродистой стали приваривают к накладке из кислотостойкой стали, которую, в свою очередь, приваривают к корпусу аппарата, а кольцевые опоры и рубашки из углеродистой

стали — к корпусу с помощью промежуточных колец из кислотостойкой стали (рис. 7).

При сварке двухслойной стали сначала сваривают основной слой, а затем соответствующими электродами — плакирующий.

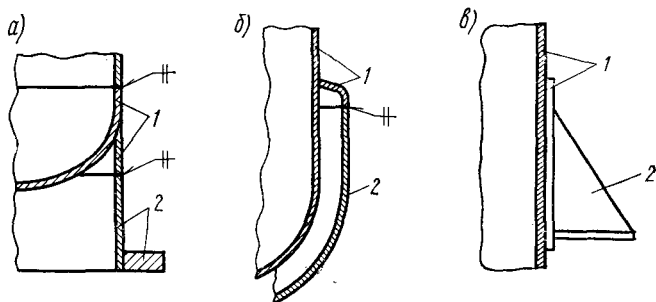


Рис. 7. Применение промежуточных деталей при сварке кислотостойких и углеродистых сталей:

а — приварка кольцевой опоры; б — приварка рубашки; в — приварка лапы; 1 — кислотостойкая сталь; 2 — углеродистая сталь

Если стенка из двухслойной стали соединена с фланцем, выполненным из основного слоя, то фланец 2 (из углеродистой стали) может быть защищен накладкой 1 из легированной (кислотостойкой) стали (рис. 8). Тогда в корпусе фланца сверлят контрольное отверстие, чтобы убедиться в герметичности швов облицовки.

**Стальное литье и поковки.** Из стальных отливок изготавливают изделия (автоклавы, ответственные детали аппаратуры, трубопроводную арматуру, фасонные детали трубопроводов и др.), работающие в тяжелых условиях. Стальные литые аппараты изготавливают из стали марок 20Л; 25Л; 20ХМЛ; Х28Л; Х18Н10ТЛ. Ковка существенно улучшает механические свойства стали, поэтому аппаратуру, работающую при высоких давлениях, изготавливают не литой, а ковкой.

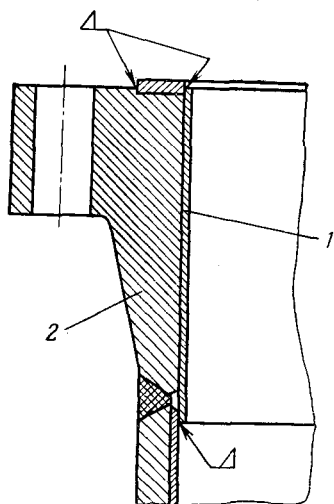


Рис. 8. Фланец аппарата из биметалла, защищенный накладкой

**Чугунное литье.** Серый чугун обладает хорошими литейными свойствами и легко обрабатывается. Коррозионная стойкость его несколько выше, чем у стали. Чугунные аппараты имеют значительно большую толщину стенки, чем стальные сварные, и, следовательно, выдерживают большую потерю на коррозию. В недалеком прошлом чугунные литые аппараты применялись более широко. В настоящее время их по возможности заменяют стальной сварной аппаратурой. Из чугуна изготавливают емкостные аппараты с мешалками, применяемые во многих технологи-

ческих процессах (сульфирование, нитрование, щелочное плавление и др.), царги колонн содового производства и некоторые другие виды аппаратов. Чугун широко используют для изготовления отдельных деталей — сальников, приводов, мешалок, трубопроводной арматуры и др.

Литые изделия не должны иметь острых углов, кромок и резко изменения толщин, так как в этих местах при охлаждении появляются трещины. Не рекомендуется отливать чугунные аппараты со стенками толщиной более 50–60 мм, так как прочность чугуна при увеличении толщины отливки падает. При изготовлении литой химической аппаратуры предъявляются повышенные требования к качеству литья: не допускается наличие больших раковин, трещин, ужимин (вмятин) и установка жеребеек — стальных стержней, остающихся в теле отливки. Правилами Госгортехнадзора допускается изготовление из чугуна аппаратов, рассчитанных на давление не более 0,8 Н/мм<sup>2</sup>, если температура стенки аппарата не превышает 250° С.

Наряду с серым чугуном для химической аппаратуры применяют легированные чугуны, обладающие повышенной химической стойкостью и жаропрочностью. Например, никелевые чугуны марки СЧЩ-1, СЧЩ-2 с содержанием никеля до 1% применяют для работы со щелочами при повышенных температурах; хромистые чугуны с содержанием хрома 30% устойчивы в растворах азотной, фосфорной и уксусной кислот; для работы с серной, азотной и соляной кислотами применяют кремнистые чугуны — ферросилиды и антихлор. Антихлор стоек к соляной кислоте, в которой интенсивно корродируют почти все металлы. Недостатки кремнистых чугунов — хрупкость, чувствительность к резким колебаниям температуры и трудность обработки их резанием. Ферросилиды обрабатывают только металлокерамическими резцами.

**Цветные металлы.** В химическом машиностроении применяют медь, алюминий, свинец, никель, титан и сплавы указанных металлов.

Медь. Из нее изготавливают теплообменники, емкостные аппараты, ректификационные колонны. Для химической аппаратуры применяют в основном медь марок М2 и М3 с содержанием соответственно 99,7 и 99,5% чистой меди. Медные аппараты, максимальная температура применения которых 250° С, используют в химической, пищевой и фармацевтической промышленности. Медь повышает свою прочность при низких температурах, сохраняя при этом пластичные свойства, поэтому она является ценным конструкционным материалом в криогенной технике. Медные листы легко вальцуются, штампуются и гнутся. В настоящее время освоена электродуговая и газовая сварка меди.

Пайку мягкими и твердыми припоями применяют для соединения двух разных металлов и изготовления медной аппаратуры с небольшой толщиной стенки (до 2,5—3 мм), когда электросварка затруднительна. Мягкий припой используют при частой замене изношенных деталей, так как его легко распаять, не нарушая цель-

ности изделия. Аппараты, паянные мягким припоем, могут работать при температуре не выше 120° С. При пайке твердым припоем припой сплавляется с наружными слоями основного металла, при этом соединение получается довольно прочное. Коэффициент прочности паяного шва приближается к коэффициенту прочности сварного соединения. Пайку, как правило, производят внахлестку, причем величина перекрытия должна быть не менее семикратной толщины листа. При пайке тонких листов для повышения прочности соединения применяют замки или фальцы, т. е. загибают края листов. Температура плавления твердых припоев (ПМЦ-52; Л-62) 840—900° С.

В химическом машиностроении находят применение сплавы меди: бронза и латунь.

Алюминиевая аппаратура. Ее используют в производстве азотной, фосфорной и органических кислот. Максимально допустимая температура для алюминиевых аппаратов 200° С. Для химического машиностроения обычно применяют алюминий марки АД0, АД1. Электродуговой или газовой сваркой соединяют части аппаратов. Сварные швы делают только стыковыми, места сварки должны быть практически одинаковой толщины. Из алюминия изготавливают резервуары (в том числе и резервуары большой емкости), колонны, теплообменники, небольшие реакционные аппараты. Применение алюминия ограничивается его низкой механической прочностью.

Свинец. Его используют для изготовления отдельных изделий (змеевиков, гильз термометров и др.) и защиты стальных аппаратов путем обкладки листовым свинцом или гомогенным освинцовыванием, которое заключается в том, что слой свинца толщиной 3—6 мм наплавляют на предварительно подготовленную поверхность. Расход свинца при этом значительно меньше, чем при обкладке аппаратов листовым свинцом. Ручной способ гомогенного освинцовывания вреден и малопроизводителен. Сейчас этот процесс механизуется. Свинец устойчив во многих агрессивных средах, в том числе и в разбавленной серной кислоте. В прошлом свинец был весьма распространенным конструкционным материалом в химическом машиностроении. В настоящее время его применение сокращается вследствие низкой механической прочности и высокой стоимости. Всюду, где возможно, свинец заменяют пластмассами или нержавеющей сталью.

Никель. Он обладает хорошими литейными свойствами, легко куется и штампуется. Его сваривают никелевыми электродами в атмосфере инертного газа. Аппаратуру из никеля применяют для процессов щелочного плавления, при переработке органических кислот, а также в тех случаях, когда требуется высокая чистота продукта или недопустимо применение кислотостойких сталей вследствие их действия как катализатора, ускоряющего ход нежелательных реакций. Никель—очень дефицитный металл и для химической аппаратуры как самостоятельный конструкционный материал применяется редко.

**Титан.** Он находится все большее применение в химическом машиностроении. По прочности он немного уступает стали, а удельный вес его почти в два раза меньше. Титан стоек в азотной кислоте любых концентраций, в разбавленной серной кислоте, в атмосфере влажного хлора и многих других корродирующих средах. Титан куется, штампуются и сваривается (за исключением отдельных его марок) и хорошо поддается механической обработке, что дает возможность изготавливать из него самое разнообразное оборудование: емкостные, колонные и теплообменные аппараты, фильтры, центрифуги, насосы, трубопроводную арматуру и др. В химическом машиностроении наиболее широко используют технически чистый титан марок ВТ-1-0 (ВТ-1-00; ВТ-1-1). Для изготовления роторов центрифуг и других нагруженных деталей применяют титановые сплавы повышенной прочности ВТ-14; ВТ-15, однако данные сплавы плохо свариваются. Аппаратура из жаропрочных титановых сплавов ВТ-8, ВТ-9 применяется до температуры 400° С.

В настоящее время освоены титановые сплавы 4200 (с присадкой палладия) и титанолибденовый сплав 4201. Данные сплавы обладают очень высокой коррозионной стойкостью, устойчивы в серной кислоте всех концентраций и в кипящей соляной кислоте. Столь высокая химическая стойкость делает их весьма перспективными в химическом машиностроении.

Титан может самовозгораться в кислородсодержащих и окислительных средах. Он обладает низкими фрикционными свойствами — в местах трения легко образуются задиры, частицы износа приобретают высокую температуру, что может вызвать взрыв и пожар. Интенсивное искрообразование наблюдается также при соударении титановых деталей. Опасность искрообразования может быть снижена правильным подбором материалов в узлах трения и соударения. Стоимость титана велика, поэтому значительный интерес представляют стальные аппараты, облицованные тонким титановым листом. Так как титан со сталью не сваривается, конструктивное решение подобных аппаратов представляет трудности. Имеются отдельные опыты применения трубных решеток теплообменников из двухслойного листа сталь-титан и емкостных аппаратов, защищенных титановым листом. Стальные фланцы данных аппаратов защищаются накладками, которые крепятся с помощью винтов.

**Тантал.** Он обладает еще более высокой химической стойкостью, не корродирует в серной, азотной, фосфорной и кипящей соляной кислотах. Тантал чрезвычайно дорог, поэтому его применяют в исключительных случаях для особо ответственных машин и аппаратов, а также в виде тонкой фольги для обкладки аппаратов. Пределы применения цветных металлов и сплавов в химическом машиностроении приведены в табл. 2.

**Неметаллические материалы органического происхождения.** В химическом машиностроении применяют пластмассы, резину, полиизобутилен и материалы на основе графита.

**Пластмассы.** Они обладают высокой стойкостью к большинству электролитов (за исключением сильных окислителей и кон-

| Марка материала                                     | Давление, Н/мм <sup>2</sup> | Температура, °С |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Медь М2; МЗ                                         | До 4,0                      | —269 ÷ +250     |
| Латунь Л62; ЛЖМУ59-1-1                              | До 4,0                      | —253 ÷ +250     |
| Алюминий и сплавы на его основе (АД-0, АД-1, АМг-2) | До 1,6                      | —253 ÷ +150     |
| Титан ВТ1-0, ВТ1-1                                  | Не ограничено               | —269 ÷ +300     |
| Титан ОТ-4                                          | То же                       | —269 ÷ +400     |

центрированной серной кислоты); во многих случаях оказываются хорошими заменителями металлов. Пластмассы подразделяют на термоплавкие и термореактивные. Термоплавкие размягчаются при нагревании и снова застывают при охлаждении; термореактивные при нагревании не размягчаются. Из многочисленных пластических масс в химическом машиностроении наиболее широко применяются в настоящее время фаолит, винипласт, полиэтилен, фторопласт.

*Фаолит.* Его изготавливают из резольной смолы и наполнителя. В зависимости от рода наполнителя различают фаолит марки А (асбестовый наполнитель) и марки Т (наполнители — графит и асбест). Этот вид термореактивной пластмассы выпускают в виде отвержденных труб и сырых листов толщиной до 20 мм, из которых при помощи штампов и моделей формуют изделия. При нагревании до 120 ÷ 130° С сырой фаолит затвердевает, приобретает достаточную механическую прочность и поддается всем видам механической обработки. Он устойчив к растворам различных минеральных и органических кислот и ко многим органическим растворителям. В щелочных средах фаолит нестоек. Температура его применения от —30 до +130° С. В сыром виде он легко формуется и режется ножом. Детали из него можно склеивать сырой фаолитовой замазкой, после отверждения которой получается прочный и плотный шов. Из фаолита изготовляют емкостные и колонные аппараты, ванны, трубопроводы, газоходы. Соединяют части аппаратов свободными фланцами или раструбами с последующим заполнением последних замазкой. Изготавливать стальные изделия, защищенные фаолитом, трудно из-за различных коэффициентов теплового расширения фаолита и стали. Чтобы избежать трещин при остывании таких изделий, необходимо обеспечить надежную связь фаолита и стали путем сверления отверстий или приварки штырей к стальному сердечнику.

*Винипласт.* Это термоплавкая пластмасса, которую выпускают в виде труб, стержней и листов толщиной до 20 мм. Он стоек к воздействию многих корродирующих сред, за исключением сильных окислителей и концентрированной серной кислоты. Температура его применения от —10 до +60° С. Механическая прочность невелика. Он хорошо поддается обработке — легко гнется и штампуются в горячем состоянии, обрабатывается на станках. Отдельные части соединяют клеей или сваривают винипластовым прутком. Из

винипласта изготовляют небольшие аппараты, электролизные ванны, трубопроводы, воздухопроводы, отдельные детали аппаратов. Его недостаток — низкая механическая прочность, хрупкость и малые температурные пределы применения.

*Полиэтилен.* Он представляет собой термопластическую пластмассу. Его химическая стойкость и термостойкость (не превышает  $60^{\circ}\text{C}$ ) примерно такая же, как и у винипласта. Так же как и винипласт, он хорошо поддается механической обработке, штамповке, сварке, но менее хрупок. Из полиэтилена изготовляют небольшие аппараты, трубопроводы, воздухопроводы.

Весьма перспективным является материал, аналогичный полиэтилену, — полипропилен, имеющий более высокие температурные пределы применения до  $150^{\circ}\text{C}$ .

*Фторопласт.* Это пластмасса, являющаяся полимером фторсодержащих органических соединений. Исключительная химическая стойкость почти во всех кислотах и растворителях и теплостойкость (до  $250^{\circ}\text{C}$ ) делают его чрезвычайно ценным материалом для химического машиностроения. Фторопласт хорошо поддается механической обработке. Выпускают его в виде труб, стержней, болванок и небольших пластин. Изделия из него изготовляют методом спекания с последующим прессованием. Из него делают детали аппаратов, седла клапанов, прокладки. Имеется опыт изготовления из фторопласта целых небольших аппаратов. Он имеет низкий коэффициент трения, поэтому его успешно применяют в качестве сальниковой набивки для подвижных соединений и втулок подшипников с небольшой нагрузкой.

*Резиновые покрытия (гуммирование).* Для защиты химических аппаратов от агрессивных сред и абразивного износа широко применяют листовые покрытия резиной, которые устойчивы во многих агрессивных средах: в соляной кислоте любой концентрации, в растворах серной кислоты концентрации до 70%, в атмосфере влажного хлора, во многих растворителях и др. Температурные пределы применения резиновых покрытий от  $-50$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ . Резиновые покрытия отличаются высокой стойкостью к вибрации и резким температурным перепадам. Гуммирование применяют для защиты емкостных и колонных аппаратов, железнодорожных цистерн, мешалок, деталей трубопроводов, центрифуг и многих других изделий.

Гуммирование осуществляют наложением листового покрытия с последующей его вулканизацией или нанесением раствора резиновой смеси. Вулканизация обычно производится паром под давлением  $0,2 \div 0,3 \text{ Н/мм}^2$ ; таким образом, наибольшие размеры изделия, подлежащего гуммированию, определяются диаметром вулканизационного котла (обычно не более  $2 \div 2,5 \text{ м}$ ; в редких случаях до  $5 \text{ м}$ ). В аппаратах, рассчитанных на давление, производить вулканизацию можно, подавая пар непосредственно в них. Большие аппараты без давления вулканизируют открытым способом, нагревая покрытие горячей водой, однако не все виды резин и эбонитов допускают такую вулканизацию. Для гуммировки применяют рези-

ны и эбониты на основе натурального или синтетических каучуков. Обычно наносят два-три слоя резинового покрытия с толщиной каждого в 1,5 мм, причем большей частью предварительно склеивают (дублируют) листы из материалов разных марок, например слой, который соединяется с металлом, выполняют из полуэбонита, наружный слой — из резины.

К аппаратам и изделиям, подлежащим гуммированию, предъявляется ряд требований по части конструкции и обработки поверхности. Должны быть закруглены углы (радиус закругления не менее 5 мм), части аппаратов и деталей легкодоступны инструменту или руке человека, сварные швы зачищены до уровня основного металла, выполнены встык. Угловых швов следует по возможности избегать, пор и раковин на поверхности металла не должно быть. Аппараты, подлежащие гуммировке, должны быть, как правило, разборными. Для вращающихся гуммированных деталей окружная скорость не более 24 м/с (для корзин центрифуг, гуммированных только эбонитом, окружная скорость 60 м/с), толщина стенок аппаратов и деталей не менее 3 мм, длина цилиндрической части аппаратов не должна превышать двух его диаметров, края днищ судов и аппаратов целесообразно делать отбортованными.

Полиизобутилен. Для защиты аппаратов применяют каучукоподобный материал, в отличие от резины он не нуждается в вулканизации, что значительно упрощает нанесение этого покрытия. Термостойкость полиизобутилена невелика — не превышает 60° С, нижний температурный предел — 20° С, что необходимо учитывать при защите аппаратов, установленных под открытым небом. Полиизобутилен очень непрочен, при повышенной температуре он размягчается и может сползти со стенок аппарата. Его применяют для защиты небольших аппаратов, а также в качестве непроницаемого подслоя под футеровку.

Материалы на основе графита. К ним относятся такие материалы, как графит и антегмит (АТМ).

*Графит.* Обладает высокой химической стойкостью и термостойкостью. Отличается пористостью, поэтому для получения плотных изделий его пропитывают смолами. Вместе с тем применяют изделия, прессованные из смеси графитового порошка с различными смолами.

*Антегмит.* Это графитовый материал, представляющий собой композицию графита и фенолформальдегидной смолы. Важное преимущество графитовых материалов по сравнению со всеми остальными неметаллическими материалами — высокая теплопроводность, дающая возможность применять их для теплообменных элементов. Из пропитанного графита и прессованных материалов на основе графита изготовляют трубы, футеровочные плитки, корпуса насосов и теплообменники различных типов — трубчатые, блочные, пластинчатые и др.

**Неметаллические материалы неорганического происхождения.** Для изготовления химической аппаратуры и отдельных ее частей применяют керамику, стекло, фарфор, плавленый диабаз.

**Кислотоупорные керамические изделия.** Их изготавливают из специальных сортов глины путем формования и последующего обжига. Керамические материалы обладают высокой стойкостью к минеральным кислотам (за исключением плавиковой кислоты), стойки ко всем органическим растворителям и в несколько меньшей степени — к растворам щелочей. Керамические изделия весьма долговечны и выходят из строя только вследствие механического разрушения. Из керамики изготавливают небольшие емкостные аппараты (бачки, монжусы), поверхностные абсорберы (туриллы, целляриусы), небольшие колонные аппараты, трубопроводы и трубопроводную арматуру. Широко применяется керамическая плитка для футеровки аппаратов и насадочные керамические кольца для колонных и башенных аппаратов.

**Стекло.** Оно обладает высокой стойкостью к минеральным кислотам (за исключением плавиковой кислоты). Из него изготавливают небольшие аппараты, предназначенные в основном для переработки особо чистых веществ. Широкое применение в химической, пищевой и фармацевтической промышленности нашли стеклянные трубы. Недостаток стекла как конструкционного материала — хрупкость и чувствительность к резким колебаниям температуры. Различают стекло силикатное, боросиликатное, выдерживающее температуру до 400° С, и кварцевое, выдерживающее 1000° С.

**Фарфор.** Он обладает высокой химической стойкостью и нечувствителен к резким колебаниям температуры. Использование фарфора в химическом машиностроении ограничено из-за высокой стоимости и сложности изготовления крупных изделий. Из фарфора изготавливают насосы, вентили, насадочные кольца.

**Плавленый диабаз.** Он отличается высокой стойкостью к кислотам (кроме плавиковой) и истиранию. Из него изготавливают кислотоупорные плитки, а также изделия (шары для мельниц, спускные желоба и др.), от которых требуется высокая стойкость к абразивному износу. В последнее время из плавленого диабаза отливают и различные фасонные детали: части аппаратов, мешалки, трубы и др.

**Футеровка аппаратов [11].** Весьма эффективным и распространенным методом защиты оборудования от химических воздействий является футеровка штучными кислотоупорными материалами: керамическим кислотоупорным кирпичом, керамической и диабазовой плитками и плитками из материалов на графитовой основе.

Весьма важен выбор замазки, от которой в значительной степени зависит стойкость и проницаемость футеровки. Для футеровочных работ применяют диабазовую или андезитовую замазку, а в щелочных и переменных средах — замазки «арзамит». Для понижения проницаемости футеровки стремятся уменьшить толщину слоя замазки в швах и применяют футеровку в два слоя с перекрытием швов. В последнее время начали применять шпунтованную диабазовую плитку, обеспечивающую хорошую плотность и прочность футеровки (рис. 9). Крупные аппараты, резервуары и башни футеруют керамическим кирпичом в один или несколько

слоев. При этом футеровка представляет собой зачастую самостоятельную конструкцию, а металлический корпус является лишь кожухом, придающим кирпичной кладке дополнительную устойчивость. Замазки, применяемые при футеровке, не обеспечивают абсолютной непроницаемости. Если возникает опасение, что проникающая через швы агрессивная жидкость может вызвать коррозию аппарата, то под футеровку укладывают непроницаемый подслои из резины, полиизобутилена или других непроницаемых материалов. В этом случае футеровка является броней, защищающей непроницаемый подслои от термических и механических повреждений. Футеровка — трудоемкое и дорогостоящее покрытие, поэтому в каждом отдельном случае необходимо проверять возможность ее замены на гуммирование или какое-либо другое, более дешевое покрытие.

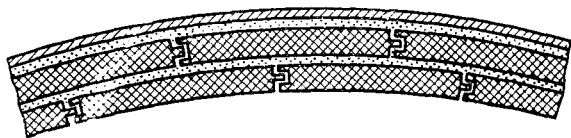


Рис. 9. Футеровка из шпунтованной диабазовой плитки

К аппаратам, подлежащим футеровке, предъявляется ряд требований:

1. Стенки аппарата должны быть достаточно жесткими. Толщину стенки цилиндрических футерованных аппаратов независимо от результатов прочностного расчета рекомендуется принимать не менее 6 мм при диаметре до 2 м и не менее 8 мм при диаметре более 2 м. Аппараты с плоскими стенками футеровать не рекомендуется, так как на них плохо держится плитка. Плоские днища необходимо укреплять балками.

2. Аппараты, подвергающиеся значительным вибрациям и сотрясениям, футеровать нельзя.

3. Внутренняя поверхность аппарата должна иметь простую конфигурацию; всякого рода ребра жесткости должны быть расположены снаружи; не допускается приварка внутри каких-либо фасонных элементов.

4. Все части аппарата должны быть доступны для производства футеровки и ее последующего ремонта. Аппараты должны иметь съемные крышки. Если нежелательно иметь разъемные крышки, то необходимо устраивать лазы, достаточно удобные для работы. Если при футеровке применяют ядовитые или взрывоопасные вещества, то неразъемный аппарат должен иметь два лаза диаметром не менее 800 мм. Колонны или газоходы диаметром менее 800 мм следует собирать из коротких царг (не более 1 м), которые наращиваются по мере производства футеровки.

5. Крайне нежелательно нарушать целостность слоя футеровки, например при необходимости крепления к стенке аппарата каких-

либо труб не следует приваривать к ней кронштейн. Более целесообразно применить закладные фасонные элементы из пластмасс или литого диабазы (рис. 10). Весьма ответственный узел — защита штуцеров футерованного аппарата (рис. 11). Штуцера защищают керамиковыми, стеклянными или фаянсовыми патрубками. Пространство между патрубком и футеровкой закладывают асбестовым шнуром, смоченным замазкой. Необходимо иметь в виду, что сечение стального патрубка после футеровки существенно уменьшается (иногда в два раза). Защита крышек футерованных аппаратов — сложная задача, так как плиточная футеровка на них не держится. Эллиптические крышки иногда футеруют отдельно,

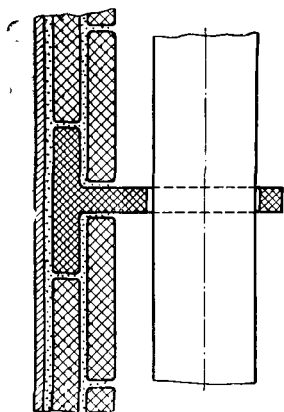


Рис. 10. Крепление деталей к стенке футерованного аппарата

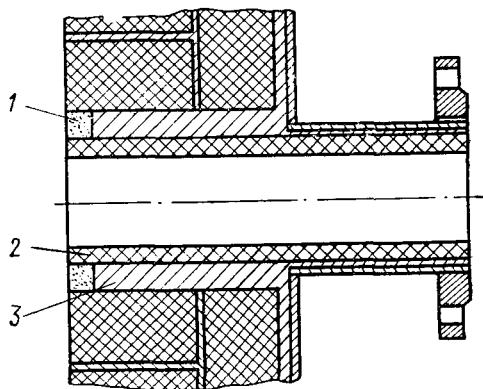


Рис. 11. Защита штуцера футерованного аппарата:

1 — замазка; 2 — керамиковый штуцер; 3 — асбестовый шнур

а затем накрывают на аппарат; широко применяют нанесение на крышки замазки по приваренной сетке. Когда крышка не подвергается интенсивному действию корродирующих покрытий, ограничиваются защитой ее листовыми или лакокрасочными покрытиями.

**Эмалированные аппараты.** Покрытия из кислотостойкой эмали стойки в растворах всех кислот, кроме плавиковой, при температурах до  $350^{\circ}\text{C}$ ; в отличие от большинства футеровок эмалевые покрытия теплопроводны. Эмалированную аппаратуру применяют для обработки агрессивных веществ, а также для процессов, требующих особой чистоты продукта. Эмалированные теплообменные элементы незаменимы при работе с особо агрессивными средами, в которых корродирует большинство металлов. Недостаток эмалевого покрытия — его непрочность. Повреждение в одном месте приводит к быстрому разрушению эмали на всей поверхности. Ремонт поврежденную эмалированную поверхность не всегда можно, поэтому приходится заменять весь аппарат, в связи с чем не всегда целесообразно применять большие эмалированные аппа-

раты. В настоящее время изготавливают емкостные эмалированные аппараты (в том числе и с мешалками), теплообменные элементы, колонны и некоторую другую аппаратуру.

### § 1.3. Испытание химических аппаратов и машин и основные требования техники безопасности

Первоначальный вид контроля, которому подвергаются все типы оборудования, — *осмотр*. При нем выявляют дефекты металла и сварных швов, проверяют соответствие изделия требованиям чертежа, а также наличие и правильность нанесения маркировки.

**Гидравлическое испытание.** Его широко применяют в химическом и нефтяном машиностроении. Испытывают все сосуды и аппараты, работающие под давлением [23], а также некоторые аппараты без давления. Величину пробного давления при гидравлическом испытании определяют по табл. 3.

Т а б л и ц а 3

| Расчетное давление,<br>Н/мм <sup>2</sup> (кгс/см <sup>2</sup> )                   | Пробное давление гидравлического испытания,<br>Н/мм <sup>2</sup> (кгс/см <sup>2</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,07 ÷ 0,5 (0,7 ÷ 5 кгс/см <sup>2</sup> )<br>0,5 (5 кгс/см <sup>2</sup> ) и более | 1,5 $p$ $[\sigma]_{20^\circ}$ / $[\sigma]_t$ , но не менее 0,2 (2 кгс/см <sup>2</sup> )<br>1,25 $p$ $[\sigma]_{20^\circ}$ / $[\sigma]_t^*$ , но не менее чем $p + 0,3$ (3 кгс/см <sup>2</sup> )<br>Не менее 0,2 (2 кгс/см <sup>2</sup> )<br>Не менее чем $p + 0,03$ (0,3 кгс/см <sup>2</sup> ) **<br>для аппаратов (содержащих летучие, пожаро-<br>взрывоопасные вещества) емкостью до 30 м <sup>3</sup> не<br>менее, чем $p + 0,01$ (0,1 кгс/см <sup>2</sup> ) ***; емкостью свы-<br>ше 30 м <sup>3</sup> — не менее, чем $p + 0,05$ (0,5 кгс/см <sup>2</sup> ). |
| Вакуум<br>Менее 0,07 (0,7 кгс/см <sup>2</sup> )<br>Атмосферное                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

\*  $[\sigma]_{20^\circ}$  — допускаемое напряжение при 20° С;  $[\sigma]_t$  — допускаемое напряжение при рабочей температуре.

\*\* Для летучих, пожаро- и взрывоопасных веществ целесообразно принимать давление испытания  $p = 0,2$  Н/мм<sup>2</sup> (2 кгс/см<sup>2</sup>).

\*\*\* Для аппаратов небольшого объема целесообразно принимать давление испытания  $p = 0,1$  Н/мм<sup>2</sup> (1 кгс/см<sup>2</sup>).

Пробное давление, определенное по этой таблице при температуре от 200 до 400° С, не должно превышать рабочее более чем в 1,5 раза, а при температуре стенки свыше 400° С — более чем в 2 раза. При испытании высоких аппаратов необходимо учитывать гидростатическое давление столба жидкости, поэтому, например, когда колонны испытывают гидравлически до монтажа в горизонтальном положении, то к величине давления гидравлического испытания, определенного по табл. 3, прибавляют гидростатическое давление, которое будет при заполнении колонны водой в вертикальном положении. Во всех случаях напряжения в стенках сосуда при гидравлическом испытании не должны составлять более 90% от предела текучести материала при 20° С.

При гидравлическом испытании аппарат отсоединяют от коммуникаций, заливают водой и в нем создается пробное давление, под которым аппарат выдерживают в течение 10÷60 мин (в зависимости от толщины стенки). Затем давление снижают до рабочего, осматривают стенки и обстукивают молотком сварные швы. Аппарат считается выдержавшим испытание, если не замечено падения давления по манометру, течи, капель или потения через сварные швы и фланцевые соединения, а также если после испытания не обнаружено признаков разрыва и остаточных деформаций. Если аппарат имеет несколько изолированных полостей (например, корпус и рубашку), то каждую полость испытывают отдельно. При гидравлическом испытании необходимо следить, чтобы аппарат был заполнен водой полностью, воздушных «мешков» в верхней части не должно оставаться. После испытания воду полностью удаляют. При испытании аппарата на улице в зимнее время подъем давления производится медленно, по специальному графику, чтобы обеспечить прогрев стенок, а после испытания необходимо особенно тщательно удалить воду из аппарата.

В соответствии с требованиями Госгортехнадзора гидравлическое испытание проводят на заводе-изготовителе, затем после монтажа аппарата на месте его работы и далее через каждые 8 лет эксплуатации аппарата. Сосуды и аппараты без давления, которые не содержат летучие, токсичные, пожаро- и взрывоопасные вещества, испытывают, налив в них воды. Залитый до верхней кромки сосуд выдерживают четыре часа с обстукиванием сварных швов молотком.

**Пневматическое испытание.** Его проводят, когда аппарат невозможно испытать гидравлически из-за больших напряжений от веса воды или из-за наличия какой-либо футеровки, которая портится от воды. В отличие от гидравлического пневматическое испытание связано с определенной опасностью для обслуживающего персонала. Поэтому при нем принимают меры предосторожности, а именно: вентили и манометр выносят в безопасное помещение, откуда обслуживающий персонал производит испытание. Когда испытывают на герметичность сосуды или аппараты, в течение определенного времени замеряют величину падения давления, которая должна быть не ниже заданной.

**Промазка сварных швов керосином.** Это специальный метод контроля, применяемый при повышенных требованиях к герметичности. С другой стороны на шов наносят меловую обмазку. При наличии в шве дефектов через 20—40 мин на обмазке появляются пятна.

**Испытание фреоном.** Этот метод позволяет выявить самые значительные неплотности сварных швов и фланцевых соединений. Аппарат заполняют смесью воздуха и фреона (концентрация фреона  $\approx 10\%$ ), поднимают давление до рабочего и проверяют сварные швы и соединения специальным чувствительным индикатором, который определяет ничтожную утечку фреона.

Сварные швы — весьма ответственные места сосудов и аппаратов, поэтому для них предусмотрен ряд испытаний. В соответствии с ОСТ 26-291—71 в зависимости от рабочих параметров сосуда и аппараты подразделяют на четыре группы (табл. 4), для каждой предусмотрен свой уровень требований к качеству сварных швов.

Таблица 4

| Группа | Параметры и назначение сосудов и аппаратов                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Объем контроля сварных швов, % |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| I      | А. Для обработки, хранения и транспортирования взрывоопасных продуктов и сильнодействующих ядовитых веществ при давлении свыше 0,07 Н/мм <sup>2</sup> (0,7 кгс/см <sup>2</sup> ).                                                                                                                                                                        | 100                            |
| II     | Б. Для сосудов и аппаратов под давлением свыше 5 Н/мм <sup>2</sup> (50 кгс/см <sup>2</sup> ) или при температуре стенки свыше 200°С                                                                                                                                                                                                                      | 100                            |
| III    | В. Для сосудов и аппаратов под давлением от 1,6 до 5,0 Н/мм <sup>2</sup> (16÷50 кгс/см <sup>2</sup> ) при температуре от —40 до +200°С, а также под давлением от 0,07 до 1,6 Н/мм <sup>2</sup> при температуре от —70 до —40°С                                                                                                                           | 50                             |
| IV     | Г. Для сосудов и аппаратов под давлением от 0,07 до 1,6 Н/мм <sup>2</sup> (0,7÷16 кгс/см <sup>2</sup> ) при температуре от —40 до +200°С                                                                                                                                                                                                                 | 25                             |
|        | А. Сосуды и аппараты для обработки, хранения и транспортирования взрывоопасных и ядовитых веществ под давлением до 0,07 Н/мм <sup>2</sup> (0,7 кгс/см <sup>2</sup> ) и под вакуумом с остаточным давлением не ниже 5 мм рт. ст. при температуре выше —40°С, а также сосуды с более высоким давлением, не попадающие под действие правил Госгортехнадзора | 25                             |
|        | Б. Сосуды и аппараты, работающие при тех же параметрах, но без взрывоопасных и ядовитых веществ                                                                                                                                                                                                                                                          | 15                             |

Первоначально производят внешний осмотр и измеряют сварные швы, при этом выявляют трещины, непровары, раковины и другие недопустимые дефекты. После внешнего осмотра сварные швы подвергают ультразвуковой дефектоскопии или просвечиванию рентгено- или гамма-лучами и механическим испытаниям. Ультразвуковая дефектоскопия и просвечивание взаимно заменяют друг друга. Объем контроля при просвечивании определяется по табл. 4. Механические испытания заключаются в испытании сварных образцов на растяжение, на изгиб и на ударную вязкость. При работе с некоторыми коррозионными средами контролируют сварные швы на склонность к межкристаллитной коррозии.

Механические узлы испытывают после сборки. Все подвижные соединения должны, как правило, свободно проворачиваться от руки. Подвижные элементы под нагрузкой испытывают обычно в течение трех часов. Все перечисленные выше методы испытаний, а также требования, предъявляемые к конструкционным материалам, обеспечивают безопасную эксплуатацию аппаратуры.

Нормами техники безопасности и правилами Госгортехнадзора предусматривается устройство предохранительных клапанов, не допускающих аварийного превышения давления в аппарате. В том случае, когда установка предохранительных клапанов не допус-

кается, установка мембраны, установка запорной арматуры между аппаратом и клапаном или мембраной не допускается. (В том случае, когда несколько аппаратов имеют общий источник давления, допускается установка одного клапана на группу аппаратов.) На аппаратах под давлением обязательно должен быть установлен манометр, на аппаратах, обогреваемых открытым пламенем, — устройства для наблюдения за уровнем жидкости.

Большое значение имеют вопросы электробезопасности и защиты от статического электричества, которое часто бывает причиной взрывов и пожаров, поэтому в конструкции машин и аппаратов должны быть предусмотрены устройства для его отвода. Например, при заливе органических жидкостей во избежание накопления на струе статического электричества трубу наполнения опускают до дна сосуда. Причиной взрыва могут быть также искры, возникающие при соударении стальных или титановых деталей, поэтому при работе с особо взрывоопасными веществами одну из соударяющихся деталей следует выполнять из меди, бронзы или др. неискрообразующих материалов. Электрооборудование выбирают с учетом категории взрывобезопасности данного предприятия. Все движущиеся детали машин и аппаратов должны иметь надежное ограждение.

#### **§ 1.4. Стандартизация в химическом машиностроении**

Химическое оборудование весьма разнообразно по конструкции, однако за последнее время на основе изучения условий работы аппаратов и машин, предназначенных для однотипных процессов, проведена большая работа по их унификации и стандартизации. Так, например, стандартизированы теплообменная аппаратура, горизонтальные резервуары, центрифуги, многие типы сушилок и другие машины и аппараты. Значительная часть химических машин и аппаратов в связи со специфическими условиями работы являются нестандартными, однако их изготавливают из сравнительно небольшого числа однотипных узлов и деталей: днищ, фланцев и др.

Это дает возможность конструировать аппараты из стандартных и нормализованных элементов. Нормализуют детали химических аппаратов, отбирая наиболее удачные конструкции, применяемые в промышленности, и проводя научно-исследовательские и расчетно-конструкторские работы, позволяющие определить рациональные параметры аппаратов и их отдельных узлов.

ГОСТы и нормали на отдельные узлы и детали аппаратов рассмотрены ниже, в параграфах, где описаны соответствующие элементы. В особую группу следует выделить ГОСТы, которые определяют основные размеры аппаратов и машин: 1) ГОСТ 9617—67 «Сосуды и аппараты. Ряды диаметров», в котором приведены ряды диаметров аппаратов из стали и цветных металлов. Для стальных аппаратов диаметром 400 мм и более базовым размером является внутренний диаметр, для аппаратов диаметром менее 400 мм за основу принимают наружный, так как их изготавливают из бесшовных труб, имеющих базовым размером также наружный диаметр.

ГОСТы и нормалы на детали аппаратов (днища, фланцы и т. д.) увязываются с рядом диаметров; изготовление аппаратов нестандартного диаметра допускается как крайнее исключение; 2) ГОСТ 9493—73 «Расчетные (условные) давления», в котором установлен ряд избыточных давлений, которым необходимо руководствоваться. Если рабочее давление не совпадает с расчетным, берут ближайшее большее значение по ГОСТу; 3) ГОСТ 13372—67\* — ряд емкостей.

ГОСТы и нормалы на различные узлы и детали химических машин и аппаратов должны соответствовать перечисленным выше ГОСТам. При разработке какой-либо машины или аппарата необходимо тщательно ознакомиться со всеми нормативными документами, относящимися к данному изделию. Применение нестандартных узлов и деталей допускается в крайнем случае и обычно требует технического обоснования.

## ГЛАВА 2

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ХИМИЧЕСКИХ МАШИН И АППАРАТОВ

#### § 2.1. Некоторые теоретические основы расчета на прочность сосудов и аппаратов

**Виды нагрузок.** Первая стадия механического расчета — определение силовых нагрузок. Наиболее часто сосуды и аппараты бывают нагружены внутренним или наружным (атмосферным) давлением при работе под вакуумом. При большой высоте аппаратов, залитых жидкостью, наряду с газовым давлением необходимо учитывать гидростатическое давление столба жидкости, которое достигает максимума в нижней точке аппарата. При расчете опорных конструкций (а часто и корпуса) существенную роль играют весовые нагрузки. Аппараты больших размеров, установленные под открытым небом, необходимо рассчитывать на действие ветровых нагрузок. В районах, подверженных землетрясениям, тяжелое оборудование, особенно колонны, необходимо также проверять и на действие сейсмических нагрузок. Наряду с перечисленными внешними нагрузками необходимо учитывать температурные напряжения, возникающие за счет неодинакового температурного удлинения отдельных частей аппарата в тех случаях, когда их температуры различны и когда одинаковы, но они изготовлены из материалов, имеющих различный коэффициент линейного расширения. Следует отметить, что даже при незначительных разностях температур температурные напряжения могут достигать весьма больших значений. Иногда именно температурные напряжения бывают причиной, казалось бы, необъяснимых разрушений аппаратов. Необходимо учитывать также температурные усилия в трубопроводах, связанных с аппаратом, действие которых может на него передаваться.

---

\* Здесь и в дальнейшем ГОСТы приведены по состоянию на 1 января 1977 г. Необходимо помнить, что они периодически пересматриваются и дополняются.

За последнее время было установлено, что на аппаратах, работающих с переменными режимами, имеют место разрушения, вызванные малоцикловыми нагрузками, которые также необходимо учитывать при расчете аппаратуры. На аппарат, как правило, действует одновременно несколько видов нагрузок, что усложняет расчет. Силовые воздействия следует определять по наихудшему варианту нагрузок. Например, наибольшие температурные напряжения могут быть при пусковых режимах, наибольшие весовые нагрузки — при гидравлическом испытании аппарата и др.

Напряжения в стенках оболочек [13, 14]. В технике наиболее широко применяют сосуды, состоящие из оболочек вращения. Рассмотрим элемент оболочки, образованной при рассечении ее двумя параллельными горизонтальными и двумя меридиональными плоскостями (рис. 12). Силы внутреннего давления, действующие на элемент, уравниваются усилиями, приложенными по его краям, касательными и поперечными силами и изгибающими моментами. Расчет сосудов с учетом действия всех указанных сил по моментной теории оболочек очень сложен и громоздок и не всегда выполним. Во многих случаях действием изгибающих моментов и поперечных сил можно пренебречь, тогда расчет ведут по упрощенным формулам безмоментной (мембранной) теории оболочек, которая рассматривает оболочку как гибкую мембрану. При этом толщину оболочки считают очень малой по сравнению с ее размерами, а напряжения предполагают равномерно распределенными по толщине.

Силы, действующие по касательной к окружности, называют *кольцевыми*, а по касательным к меридианам — *меридиональными* (осевыми). Кольцевые силы вызывают кольцевые напряжения, а меридиональные силы — меридиональные напряжения. Напряжения в стенках простейших оболочек:

1) для цилиндра, закрытого с концов крышками,

$$\sigma_k = pR/s, \quad (2)$$

$$\sigma_m = pR/(2s), \quad (3)$$

где  $p$  — избыточное давление;  $R$  — средний радиус цилиндра;  $s$  — толщина стенки.

Таким образом, в цилиндрической оболочке кольцевые напряжения в два раза больше меридиональных. Для вертикального цилиндрического сосуда, заполненного жидкостью, гидростатическое давление  $p = h\gamma$ , где  $h$  — высота столба жидкости;  $\gamma$  — удельный вес

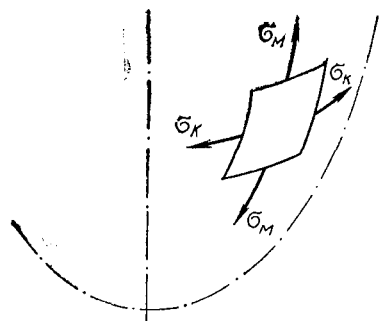


Рис. 12. Схема действия кольцевых и меридиональных напряжений

жидкости. Под действием этого давления в стенках сосуда возникают кольцевые напряжения  $\sigma_k = h\gamma R/s$ ;

2) для сферы или части сферы

$$\sigma_m = \sigma_k = pR/(2s); \quad (4)$$

3) для конической оболочки (рис. 13)

$$\sigma_k = pr/(s \cos \alpha); \quad (5)$$

$$\sigma_m = pr/(2s \cos \alpha), \quad (6)$$

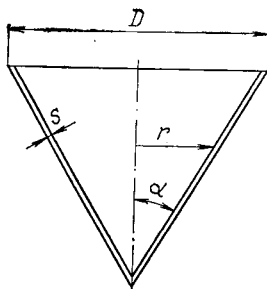


Рис. 13. Коническая оболочка

где  $r$  — средний радиус кольца в точке, для которой определяется напряжение;  $\alpha$  — угол между осью и образующей конуса.

Наибольшие напряжения действуют на краю конической оболочки, где  $r = D/2$ .

Приведенные теоретические формулы служат основой для построения практических (инженерных) формул для расчета обечаек и днщ сосудов и аппаратов.

**Краевые и распорные силы.** Ранее рассматривались напряжения, действующие в оболочках, независимо от способа их соединения. Между тем сосуды под давлением состоят из нескольких различных оболочек,

связанных между собой, например из цилиндра, сваренного с выпуклыми крышками. Под действием давления оболочки подвергаются упругой деформации. Если представить, что корпус и крышки не связаны между собой, то края оболочек разойдутся вследствие их различной деформации. В реальной конструкции целостность аппарата не должна быть нарушена, поэтому радиальное смещение краев сопряженных оболочек и углы их поворота должны быть одинаковыми. В местах соединения оболочек возникают краевые силы и моменты, вызывающие краевые напряжения, которые появляются также и при сопряжении цилиндрических оболочек различной толщины, так как более тонкостенная оболочка деформируется больше, чем толстостенная. Напряжения возникают и вследствие распорных сил, которые действуют при сопряжении оболочек под углом (рис. 14). Если мысленно отделить крышку от корпуса, то горизонтальная составляющая меридиональных напряжений  $P$  должна быть уравновешена силами, действующими на краю цилиндрического корпуса. Так как сила  $P$  ничем не уравновешивается, то возникают распорные силы, которые стремятся изогнуть край обечайки. Напряжения, вызванные краевыми силами, носят местный характер. Они достигают наибольшего значения непосредственно на краю и по мере удаления от него быстро угасают.

Расчеты и опытные данные показывают, что при плавном сопряжении оболочек краевые напряжения невелики. Напряжения же от распорных сил достигают значительной величины. В том слу-

чае, если угол между образующими двух оболочек превышает  $30^\circ$ , для компенсации распорных сил приходится устанавливать укрепляющие кольца. Площадь сечения укрепляющего кольца

$$F = PR/[\sigma], \quad (7)$$

где  $P$  — распорная сила, Н/мм;  $R$  — радиус цилиндра, мм;  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение, Н/мм<sup>2</sup>.

Распорная сила для сферы (рис. 14, а)

$$P = \frac{pr}{2} \cos \varphi, \quad (8)$$

для конуса (рис. 14, б)

$$P = \frac{pr}{2} \sin \alpha. \quad (9)$$

Выражение (7) не учитывает полностью всех усилий, возникающих после установки кольца, однако оно пригодно для приближенных расчетов. Укрепляющее кольцо необходимо проверять на устойчивость, так как на него действуют сжимающие силы.

Для сосудов из пластичных материалов (сталь, медь, алюминий) краевые напряжения не так опасны. Когда местные напряжения превышают предел упругости, происходит пластическая деформация краев, образуется пластический шарнир и напряжения выравниваются. Краевые и местные напряжения особенно опасны для хрупких материалов. Поэтому при конструировании аппаратов из чугуна, ферросилида, керамики и других подобных материалов необходимо избегать острых углов, резкого изменения толщины и других факторов, вызывающих краевые и местные напряжения.

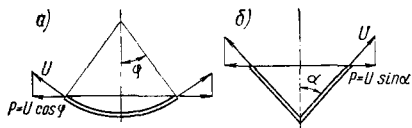


Рис. 14. Возникновение распорных сил

## § 2.2. Выбор исходных данных для инженерного расчета

Теоретические формулы, рассмотренные выше, необходимо привести к виду, удобному для практических расчетов. Как правило, все формулы для прочностных расчетов сосудов и аппаратов бывают решены относительно толщины  $s$ , так как ее определение обычно представляет наибольший интерес. При определении толщины стенки необходимо правильно выбрать расчетное давление (и другие силовые факторы), а вместо напряжения  $\sigma$  в формулу подставить величину допускаемого напряжения  $[\sigma]$ .

**Расчетные давление и температура.** Рабочим давлением считается максимальное избыточное давление, возникающее при нормальном протекании технологического процесса.

Если отсутствуют причины, вызывающие превышение рабочего давления, то расчетное давление принимают равным рабочему. Если

превышение давления все-таки возможно, то необходимо учитывать запаздывание срабатывания предохранительных устройств — клапанов или мембран. Правилами Госгортехнадзора допускается превышение давления за счет запаздывания предохранительного клапана или мембраны для сосудов и аппаратов, работающих под давлением до  $0,3—0,05 \text{ Н/мм}^2$  под давлением  $0,3÷6 \text{ Н/мм}^2$  — на 15% и для сосудов с давлением свыше  $6,0 \text{ Н/мм}^2$  — на 10%.

По существующим нормам [26] расчетное давление принимают равным 90% от давления срабатывания клапана или мембраны. Например, если аппарат с предохранительным клапаном имеет рабочее давление  $3 \text{ Н/мм}^2$ , то расчетное давление  $3,0 \cdot 1,15 \cdot 0,9 = 3,1 \text{ Н/мм}^2$ .

Для аппаратов, заполненных жидкостью, необходимо также принимать в расчет гидростатическое давление, если его величина превышает 5% от расчетного газового. Для аппаратов без давления, но работающих с взрывоопасными и сильно ядовитыми продуктами или летучими органическими веществами, иногда условно принимают расчетное давление  $0,1÷0,2 \text{ Н/мм}^2$ .

Температура не входит непосредственно в расчетные формулы, однако ее необходимо знать для определения характеристик конструкционного материала. Расчетную температуру стенки определяют тепловым расчетом или принимают равной температуре среды, соприкасающейся со стенкой. При обогреве стенки сосуда, содержащего жидкость, открытым пламенем, горячими газами или открытыми электронагревателями температуру стенки принимают выше температуры среды в аппарате на  $50^\circ \text{C}$ , но не менее чем  $250^\circ \text{C}$ .

**Допускаемые напряжения.** Правильный выбор допускаемых напряжений чрезвычайно важен, так как при расчете необходимо обеспечить достаточную прочность и надежность изделия и вместе с тем не допускать необоснованного его утяжеления. Допускаемое напряжение зависит от механических свойств материала, рабочей температуры, характера нагрузки и условий работы аппарата.

Условия работы аппарата учитываются поправочным коэффициентом  $\eta$  по ОСТ 26-01-102—70 (табл. 5). С учетом поправочного коэффициента допускаемое напряжение  $[\sigma] = \eta \sigma^*$ , где  $\sigma^*$  — нормативное допускаемое напряжение.

Таблица 5

| Категория опасности химических продуктов | Предельно допустимая концентрация по санитарным нормам, $\text{мг/м}^3$ | Нижний предел взрываемости, % | Минимальная температура самовоспламенения, $^\circ \text{C}$ | Поправочный коэффициент $\eta$ к нормативным допускаемым напряжениям |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| I                                        | Менее 50                                                                | Менее 5                       | Менее 300                                                    | 0,9                                                                  |
| II                                       | $50÷100$                                                                | $5÷10$                        | $300÷450$                                                    | 0,95                                                                 |
| III                                      | Более 1000                                                              | Более 10                      | Более 450                                                    | 1,00                                                                 |

Если расчетная температура не превышает для углеродистых сталей 380° С, а для аустенитных 525° С, то за нормативное допускаемое напряжение принимают наименьшее из следующих двух значений:  $\sigma^* = \sigma_{\text{пч}}/n_{\text{пч}}$ ;  $\sigma^* = \sigma_{\text{т}}/n_{\text{т}}$ . Здесь  $\sigma_{\text{пч}}$  — предел прочности при расчетной температуре;  $\sigma_{\text{т}}$  — предел текучести при расчетной температуре;  $n_{\text{пч}}$ ,  $n_{\text{т}}$  — запасы прочности по пределу прочности и пределу текучести.

При более высокой температуре наблюдается явление ползучести. Поэтому нормативное напряжение при высоких температурах проверяют также по пределу длительной прочности  $\sigma = \sigma_{\text{д}}/n_{\text{д}}$ , где  $\sigma_{\text{д}}$  — значение предела длительной прочности за 100 000 ч работы при расчетной температуре;  $n_{\text{д}} = 1,5$  — запас прочности по пределу длительной прочности.

Т а б л и ц а 6

| Расчетная температура стенки, °С | Конструкционный материал |      |         |                |       |                                           |                                           |
|----------------------------------|--------------------------|------|---------|----------------|-------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                  | Ст3                      | 10   | 20; 20К | 09Г2С;<br>16ГС | Х5М   | 12Х18Н10Т;<br>10Х17Н13М2Т;<br>10Х17Н13М3Т | 08Х18Н10Т;<br>08Х17Н13М2Т;<br>08Х17Н15М3Т |
| 20                               | 140                      | 130  | 147     | 170            | 146   | 160                                       | 140 (133)****                             |
| 100                              | 134                      | 125  | 142     | 160            | 141   | 152                                       | 130                                       |
| 150                              | 131                      | 122  | 139     | 154            | 138   | 146                                       | 120                                       |
| 200                              | 126                      | 118  | 136     | 148            | 134   | 140                                       | 115                                       |
| 250                              | 120                      | 112  | 132     | 145            | 127   | 136                                       | 110                                       |
| 300                              | 108                      | 100  | 119     | 134            | 120   | 130                                       | 100                                       |
| 350                              | 98                       | 88   | 106     | 123            | 114   | 126                                       | 91                                        |
| 375                              | 93                       | 82   | 96      | 116            | 110,5 | 124                                       | 89                                        |
| 400                              | 85                       | 74   | 92      | 110            | 105   | 121                                       | 86                                        |
| 410                              | 87                       | 70   | 86      | 104            | 103   | 120                                       | 86                                        |
| 420                              | 75                       | 66   | 80      | 92             | 101   | 120                                       | 85                                        |
| 430                              | 71*                      | 62   | 75      | 86             | 99    | 119                                       | 85                                        |
| 440                              | —                        | 56   | 67      | 75             | 96    | 118                                       | 84                                        |
| 450                              | —                        | 51   | 61      | 71             | 94    | 117                                       | 84                                        |
| 460                              | —                        | 47   | 55      | 64             | 91    | 116                                       | 83                                        |
| 470                              | —                        | 42   | 49      | 56             | 89    | 115                                       | 83                                        |
| 480                              | —                        | 39** | 46**    | 53             | 86    | 115                                       | 82                                        |
| 490                              | —                        | —    | —       | —              | 83    | 114                                       | 82                                        |
| 500                              | —                        | —    | —       | —              | 79    | 113                                       | 81                                        |
| 520                              | —                        | —    | —       | —              | 66    | 112                                       | 79                                        |
| 540                              | —                        | —    | —       | —              | 54    | 111                                       | 78                                        |
| 560                              | —                        | —    | —       | —              | 47*** | 101                                       | 73                                        |
| 580                              | —                        | —    | —       | —              | —     | 90                                        | 65                                        |
| 600                              | —                        | —    | —       | —              | —     | 74                                        | 57                                        |
| 620                              | —                        | —    | —       | —              | —     | 62                                        | —                                         |
| 640                              | —                        | —    | —       | —              | —     | 52                                        | —                                         |
| 660                              | —                        | —    | —       | —              | —     | 45                                        | —                                         |
| 680                              | —                        | —    | —       | —              | —     | 38                                        | —                                         |
| 700                              | —                        | —    | —       | —              | —     | 30                                        | —                                         |

\* Для температуры 425° С.

\*\* Для температуры 475° С.

\*\*\* Для температуры 550° С.

\*\*\*\* Размер в скобках — для сталей 0Х17Н13М2Т; 0Х17Н15М3Т.

Для стальных отливок значения  $\sigma^*$  уменьшают: для отливок, подвергающихся индивидуальному контролю качества, — в 1,25 раза, для остальных — в 1,4 раза.

Нормативные допускаемые напряжения ( $H/mm^2$ ) для наиболее распространенных марок стали приведены в табл. 6.

Нормативные допускаемые напряжения для меди, алюминия и титана в зависимости от температуры стенки приведены в табл. 7.

Для чугунных аппаратов допускаемое напряжение определяют по пределу прочности  $[\sigma] = \sigma_{пч}/4,5$ .

Таблица 7

| Расчетная температура стенки, °С | Допускаемые напряжения на растяжение, $H/mm^2$ |       | Расчетная температура стенки, °С | Допускаемые напряжения на растяжение, $H/mm^2$ | Расчетная температура стенки, °С | Допускаемые напряжения на растяжение, $H/mm^2$ |
|----------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
|                                  | для титана [27]                                |       | для отожженной прокатной меди    |                                                | для мягкого алюминия             |                                                |
|                                  | BT1-0                                          | OT4-0 |                                  |                                                |                                  |                                                |
| 20                               | 133                                            | 167   | До 120                           | 44,0                                           | До 30                            | 15,0                                           |
| 100                              | 118                                            | 145   | 121 ÷ 140                        | 42,0                                           | 31 ÷ 60                          | 14,0                                           |
| 200                              | 93                                             | 111   | 141 ± 160                        | 40,0                                           | 61 ÷ 80                          | 13,0                                           |
| 250                              | 85                                             | 100   | 161 ÷ 180                        | 38,0                                           | 81 ± 100                         | 12,0                                           |
|                                  |                                                |       | 181 ÷ 200                        | 36,0                                           | 101 ÷ 120                        | 10,5                                           |
|                                  |                                                |       | 201 ÷ 230                        | 32,0                                           | 121 ÷ 140                        | 9,0                                            |
|                                  |                                                |       | 231 ÷ 250                        | 30,0                                           | 141 ÷ 160                        | 7,5                                            |
|                                  |                                                |       |                                  |                                                | 161 ÷ 180                        | 6,0                                            |
|                                  |                                                |       |                                  |                                                | 181 ÷ 200                        | 4,5                                            |

**Коэффициент прочности сварного шва.** При расчете сварных сосудов и аппаратов вводится коэффициент прочности сварного шва  $\phi$ , принятые значения которого приведены ниже:

- А. Для стальных сосудов и аппаратов (по ОСТ 26-291—71)
- Для стыковых и тавровых соединений с двусторонним сплошным проваром, выполненных автоматической сваркой . . . . . 1,00
  - Для односторонних стыковых соединений с подваркой корня шва и тавровых соединений, выполненных вручную . . . . . 0,95
  - Для стыковых сварных соединений с подкладкой . . . . . 0,90
  - Для соединений втавр без сплошного провара и внахлестку . . . . . 0,80
- Б. Для титановых сосудов и аппаратов (по ОСТ 26-01-279—71)
- Для стыковых соединений с двусторонним проваром при автоматической сварке с флюсом и ручной сварке в среде аргона . . . . . 0,95
  - Для соединений втавр с двусторонним проваром при автоматической и ручной сварке в среде аргона . . . . . 0,90
  - Для соединений втавр без сплошного провара . . . . . 0,80
  - Для стыковых односторонних швов в среде аргона . . . . . 0,70

Тип сварного соединения назначается проектирующей организацией или заводом-изготовителем. Как уже указывалось, автоматическая сварка предпочтительнее ручной, а двусторонний сварной шов предпочтительнее одностороннего.

**Прибавка на коррозию.** В случае действия корродирующих агентов действительная толщина стенки должна быть несколько больше

расчетной, так как необходимо учитывать влияние коррозии, которая со временем утончает стенку. Величина прибавки на коррозию равна скорости коррозии  $v$  (мм/г), умноженной на срок службы  $t$  аппарата (обычно  $10 \div 12$  лет):  $c = vt$ . Скорость коррозии определяют по справочникам или лабораторными испытаниями. Прибавку на коррозию обычно принимают  $1 \div 2$  мм, что соответствует скорости  $0,1 \div 0,2$  мм/г. При более интенсивной коррозии стенки аппарата необходимо защищать антикоррозионными покрытиями или заменять конструкционный материал другим, более коррозионностойким. Для ответственных частей аппаратов скорость коррозии может быть принята и большей. Если стенка подвергается коррозии с двух сторон, то необходимо ввести две прибавки на коррозию.

В случае необходимости вводят также дополнительную прибавку  $c_1$ , которую принимают иногда равной минусовому отклонению толщины листа. Для чугунных отливок прибавку на коррозию и возможную разностенность отливок принимают равной  $5 \div 9$  мм.

Для аппаратов из двухслойной стали в расчет принимается только слой основного металла, а плакирующий слой может быть учтен только в качестве прибавки на коррозию.

В настоящее время расчеты основных элементов аппаратов нормализованы. В частности, обечайки и днища стальных аппаратов при давлении не более  $10 \text{ Н/мм}^2$  рассчитывают по ГОСТ 14249—73 («Сосуды и аппараты, нормы и методы расчета на прочность»); аппаратов из титана — по ОСТ 26-01-279—71.

Отступление от стандартизированных методов расчета возможно в тех случаях, когда конструкция и параметры изделия или конструкционный материал не подходят под стандартный расчет.

### § 2.3. Конструирование и расчет обечайек

Сварные цилиндрические обечайки диаметром до 600 мм изготовляют с одним меридиональным швом. Обечайки большего диаметра делают с несколькими швами.

При изготовлении аппаратов необходимо иметь в виду допуски на изготовление обечайек, а именно: допустимая овальность обечайки составляет 1% от номинального диаметра, но не более 20 мм. Под давлением до  $10 \text{ Н/мм}^2$  толщина стенки обечайки (мм)

$$S = pD / (2\varphi[\sigma] - p) + c + c_1, \quad (10)$$

где  $p$  — расчетное давление,  $\text{Н/мм}^2$ ;  $D$  — внутренний диаметр, мм;  $c$  — прибавка на коррозию, мм;  $c_1$  — конструктивная прибавка, мм;  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение,  $\text{Н/мм}^2$ ;  $\varphi$  — коэффициент прочности сварного шва.

Формула получена на основе уравнения (2). Заменяя средний диаметр  $D_{\text{ср}} = D_{\text{вн}} + s$  на внутренний и вводя величины  $\varphi$  и  $c$ , после несложных преобразований получаем выражение (10).

Формула (10) применима при  $(s - c)D \leq 0,1$ . При  $\varphi[\sigma]/p \geq 50$ , величиной  $p$  в знаменателе можно пренебречь.

Толщину стенки округляют в сторону увеличения до ближайшей стандартной толщины листа. Допускается принимать толщину стенки меньше расчетной не более чем на 3%.

Преобразовав формулу (10), определим при заданной толщине стенки допустимое давление  $p = 2[\sigma]\varphi(s - c - c_1) / (D + s - c - c_1)$  и напряжение, действующее в стенках аппарата,  $\sigma = p(D + s - c - c_1) : [2\varphi(s - c - c_1)]$ .

Величину  $s - c - c_1$  можно рассматривать как толщину стенки аппарата к концу срока его службы.

При расчете обечаек, работающих с незначительным внутренним давлением или под наливом, необходимо учитывать не только условия прочности, но и жесткости оболочки. Толщину стенки аппаратов и условий жесткости и удобства сварки не следует принимать менее 3 мм.

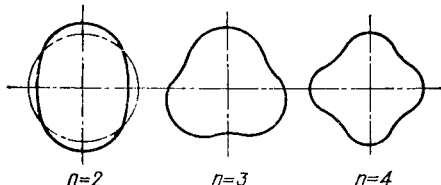


Рис. 15. Искажение оболочки круглой формы под действием наружного давления

**Расчет цилиндрических аппаратов, нагруженных наружным давлением.** Под наружным давлением находятся вакуумные аппараты, корпуса с рубашками и различные внутренние устройства

(греющие камеры выпарных установок и др.). При этом в стенках возникают сжимающие напряжения. Толщину стенки аппарата, находящегося под наружным давлением, рассчитывают на прочность по тем же формулам и с теми же запасами прочности, что и аппараты с внутренним давлением. Коэффициент прочности сварного шва в этом случае принимают равным единице. Однако для аппаратов, находящихся под внешним давлением, одного расчета на прочность недостаточно. Необходимо проверить также устойчивость оболочки. Тонкостенные оболочки под действием наружного давления могут потерять свою первоначальную форму и расплющиться раньше, чем напряжение сжатия достигнет разрушающей величины. Давление, при котором оболочка начнет деформироваться, называется *критическим давлением*. Напряжение, соответствующее критическому давлению, называется *критическим напряжением*:

$$\sigma_{кр} = p_{кр} D / (2s). \quad (11)$$

Вследствие отклонения формы обечайки от идеально круглой, случайных вмятин и неоднородности материала расплющивание оболочек происходит обычно значительно раньше, чем напряжения примут критические значения, поэтому в расчет вводят запас устойчивости, аналогичный запасу прочности. Для приведенных ниже расчетных формул запас устойчивости  $m = 2,6$ . Деформированная оболочка приобретает волнообразную форму, причем число волн  $n = 2, 3, 4, \dots$  (рис. 15).

Для стальных оболочек проверку на устойчивость следует производить при отношении  $(s - c - c_1) / D \leq 0,04$  или наружном давлении менее  $4 \div 5$  Н/мм<sup>2</sup>. При более значительном давлении толщина

стенки при расчете на прочность получается достаточно большой и проверка на устойчивость, как правило, не требуется.

По отношению к расчету на устойчивость оболочки условно разделяют на длинные и короткие. Если длина оболочки значительна (более  $5 \div 7$  диаметров), то оболочку рассчитывают как длинную. В данном случае крышки или кольца жесткости не оказывают укрепляющего действия на среднюю часть оболочки, поэтому толщина стенки не зависит от длины. Если расстояние между крышками или кольцами жесткости невелико, то укрепляющее действие крышек или колец жесткости необходимо учитывать и оболочку рассчитывать как короткую. Расчетной длиной оболочки считают расстояние между ее концами, а при наличии колец жесткости, — наибольшее расстояние между ними. Если оболочка сопрягается с эллиптическим

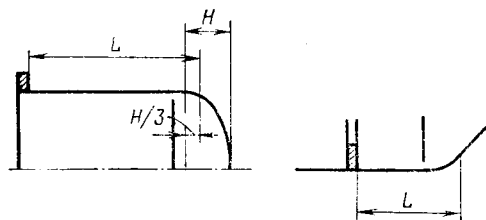


Рис. 16. Определение расчетной длины оболочки

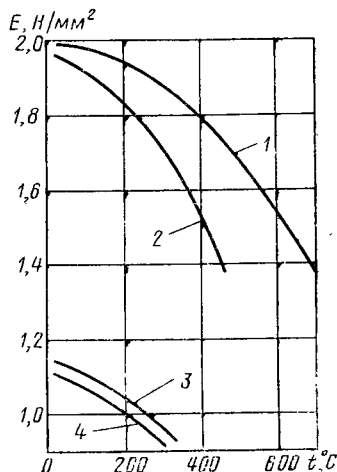


Рис. 17. График зависимости модуля упругости от температуры:

1 — легированные стали аустенитного класса; 2 — углеродистые стали; 3 — титан ОТ4-0; 4 — титан ВТ1-0

днищем, то расчетную длину  $L$  увеличивают на  $1/3$  высоты  $H$  эллиптической части днища; при сопряжении обечайки с коническим отбортованным днищем длину отсчитывают от края отбортовки (рис. 16).

Для длинных оболочек критическое давление

$$p_{кр} = \frac{2E}{1-\mu^2} \left( \frac{s}{D} \right)^3, \quad (12)$$

где  $E$  — модуль упругости при расчетной температуре (рис. 17);  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Вводя в (12) запас устойчивости  $m=2,6$  и принимая  $\mu=0,3$ , получаем уравнение для расчета длинной оболочки

$$s = 1,06 \frac{D}{100} \sqrt[3]{\frac{p}{10^{-6}E}} + c + c_1, \quad (13)$$

область применения которого  $L/D > 7,68 \sqrt[6]{10^{-6}E p}$ , где  $L$  — расчетная длина оболочки.

Если имеет место условие  $0,052 \sqrt[4]{\frac{p}{10^{-6}E}} \leq \frac{L}{D} \leq 7,68 \times$   
 $\times \sqrt[6]{\frac{10^{-6}E}{p}}$ , то оболочку рассчитывают как короткую:

$$s = 0,47 \frac{D}{100} \left( \frac{p}{10^{-6}E} \cdot \frac{L}{D} \right)^{0,4} + c + c_1. \quad (14)$$

Для удобства расчетов значения  $[(p/10^{-6}E)(L/D)]^{0,4}$  определяют по табл. 8.

Таблица 8

| $\left(\frac{p}{10^{-6}E} \frac{L}{D}\right)$ | $\left(\frac{p}{10^{-6}E} \frac{L}{D}\right)^{0,4}$ | $\left(\frac{p}{10^{-6}E} \frac{L}{D}\right)$ | $\left(\frac{p}{10^{-6}E} \frac{L}{D}\right)^{0,4}$ | $\left(\frac{p}{10^{-6}E} \frac{L}{D}\right)$ | $\left(\frac{p}{10^{-6}E} \frac{L}{D}\right)^{0,4}$ |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 0,3                                           | 0,617                                               | 1,8                                           | 1,27                                                | 9,0                                           | 2,40                                                |
| 0,32                                          | 0,636                                               | 2,0                                           | 1,32                                                | 10,0                                          | 2,51                                                |
| 0,35                                          | 0,658                                               | 2,2                                           | 1,37                                                | 11,0                                          | 2,61                                                |
| 0,40                                          | 0,693                                               | 2,4                                           | 1,42                                                | 12,0                                          | 2,70                                                |
| 0,45                                          | 0,730                                               | 2,6                                           | 1,47                                                | 14,0                                          | 2,88                                                |
| 0,50                                          | 0,757                                               | 2,8                                           | 1,52                                                | 16,0                                          | 3,04                                                |
| 0,55                                          | 0,787                                               | 3,0                                           | 1,56                                                | 18,0                                          | 3,18                                                |
| 0,60                                          | 0,813                                               | 3,2                                           | 1,60                                                | 20,0                                          | 3,32                                                |
| 0,70                                          | 0,870                                               | 3,5                                           | 1,65                                                | 22,0                                          | 3,46                                                |
| 0,80                                          | 0,940                                               | 4,0                                           | 1,74                                                | 25,0                                          | 3,65                                                |
| 0,90                                          | 0,955                                               | 4,5                                           | 1,82                                                | 28,0                                          | 3,80                                                |
| 1,0                                           | 1,0                                                 | 5,0                                           | 1,90                                                | 30,0                                          | 3,83                                                |
| 1,1                                           | 1,04                                                | 6,0                                           | 2,04                                                | 35,0                                          | 4,15                                                |
| 1,2                                           | 1,075                                               | 7,0                                           | 2,18                                                | 40,0                                          | 4,4                                                 |
| 1,4                                           | 1,14                                                | 8,0                                           | 2,36                                                | 45,0                                          | 4,6                                                 |
| 1,6                                           | 1,21                                                |                                               |                                                     | 50,0                                          | 4,8                                                 |

При определении расчетной формулы следует иметь в виду, что при  $L/D < 5$  оболочки практически всегда рассчитывают как короткие. Выражения (13) и (14) применимы, если напряжения в оболочках не превышают предела текучести, что имеет место при соблюдении условий: для длинных оболочек  $(s - c - c_1)/E \leq 0,95 \sqrt{\sigma_T/E}$ ; для коротких оболочек

$$(s - c - c_1)/D \leq 1,1 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{(L/D)^2 [\sigma_T/(10^{-3}E)]^2},$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести материала при расчетной температуре.

Если данные условия не соблюдаются, то при заданной толщине стенки допускаемое наружное давление

$$p_{\text{дон}} = 2E(s - c - c_1)/(D\xi), \quad (15)$$

где для коротких оболочек  $\xi = \frac{1,5E}{\sigma_T} + 1,53 \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{D}{s - c - c_1} \left( \frac{L}{s - c - c_1} \right)^2$

для длинных оболочек  $\xi = 1,5E/\sigma_T + [D/(s - c - c_1)]^2$ . Задачу в данном случае решают методом последовательных приближений.

Так как толщина стенки значительно уменьшается при уменьшении расчетной длины оболочки, то одним из способов облегчения обечайки, нагруженной наружным давлением, является установка колец жесткости. Кольца устанавливают как снаружи обечайки, так и внутри нее. Чтобы кольцо было надежно связано с обечайкой, общая длина сварного шва должна быть не менее половины длины кольца.

Установка колец внутри обечайки более надежна, так как в данном случае сварной шов не испытывает дополнительных нагрузок, но в случае необходимости (например, при наличии антикоррозионной защиты) кольца приваривают к наружной стенке обечайки. Кольца жесткости изготавливают из полосы или проката.

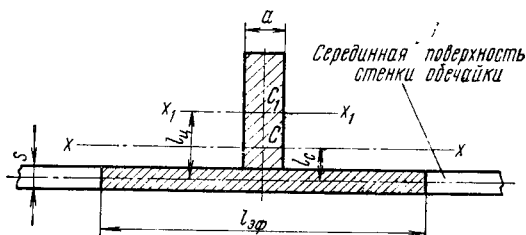


Рис. 18. К расчету оболочек с кольцами жесткости

Когда расстояние между кольцами больше половины диаметра, необходимый момент инерции сечения кольца

$$J_{тр} = \frac{l}{12} \left[ 1,18 \frac{pD^3}{E} - (s - c - c_1)^3 \right], \quad (16)$$

где  $l$  — расстояние между кольцами жесткости, мм.

Эффективный момент инерции поперечного сечения кольца жесткости

$$J_{xx} = J_0 + F(l_{ц.т} - l_c)^2 + \frac{l_{эф}(s - c - c_1)^3}{10,92} \left[ 1 + 12 \left( \frac{l_c}{s - c - c_1} \right)^2 \right],$$

где  $J_0$  — момент инерции сечения кольца жесткости относительно собственной оси  $x_1-x_1$  (рис. 18), проходящей через центр тяжести (ЦТ);  $F$  — площадь поперечного сечения кольца;  $l_{ц.т}$  — расстояние от оси ЦТ поперечного сечения кольца жесткости до середины стенки обечайки;  $l_c$  — расстояние от оси, лежащей на середине стенки обечайки, до ЦТ поперечного сечения, включающего на себя кольцо жесткости и часть стенки обечайки длиной  $l_{эф}$ ;  $l_{эф} = a + 1,1 \times \sqrt{D(s - c - c_1)}$  — эффективная длина обечайки, включаемая в расчетное сечение кольца жесткости не более чем  $a + 30(s - c - c_1)$ ;  $a$  — ширина поперечного сечения кольца жесткости, находящаяся в контакте с поверхностью стенки обечайки. Эффективный момент инерции  $J_{эф} > J_{тр}$ , рассчитанного по (16).

Расчет оболочек с кольцами жесткости, расположенными друг от друга на расстоянии менее  $0,5D$ , рассмотрен в ГОСТ 14249—73.

Вопросы расчета на наружное давление оболочек, которые представляют собой часть цилиндра, ограниченного образующими, в настоящее время недостаточно проработаны. Пример такой оболоч-

ки — корпус горизонтального сосуда с рубашкой, обогревающей нижнюю часть. Толщина стенки такой оболочки даже при сравнительно небольшом угле обхвата должна быть не меньше, чем для полной цилиндрической обечайки. Оболочки с малым углом обхвата ( $\alpha < 20^\circ$ ) можно рассчитывать с известным приближением как плоские пластинки.

## § 2.4. Днища и крышки аппаратов

**Полушаровые (сферические) днища.** Для сосудов и аппаратов применяют полушаровые, эллиптические, конические, тарельчатые и плоские днища и крышки. Сфера — идеальная форма для днища, так как в сферической оболочке не возникают изгибающие напряжения.

Полушаровые днища сваривают из отдельных штампованных элементов. Их применяют для аппаратов больших диаметров (свыше 4000 мм), для аппаратов небольшого размера — сравнительно редко, так как они неудобны для размещения штуцеров и сложны в изготовлении (их нельзя штамповать из цельного листа как эллиптические днища). Толщина стенки сферического днища, нагруженного внутренним давлением,

$$s = pD / [4[\sigma]\varphi - p] + c + c_1, \quad (17)$$

где  $p$  — избыточное давление, Н/мм<sup>2</sup>;  $D$  — внутренний диаметр днища, мм;  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение, Н/мм<sup>2</sup>;  $\varphi$  — коэффициент прочности сварного шва;  $c$  — прибавка на коррозию, мм;  $c_1$  — конструктивная прибавка, мм.

**Эллиптические днища.** Эллиптические днища, имеющие форму эллипсоида вращения, широко применяют для аппаратов под давлением (рис. 19, а). Для того чтобы отвести сварной шов от закругленной части и не нагружать его изгибающими напряжениями, днище снабжают цилиндрическим бортом высотой 25÷50 мм.

Отношение высоты (мм) эллиптической части днища к диаметру  $H/D = 0,25$ . Имеются также ГОСТы и нормали на эллиптические днища из меди, алюминия, титана, винипласта. Толщина стенки эллиптических днищ, нагруженных внутренним давлением,

$$s = pR / (2[\sigma]\varphi - 0,5p) + c + c_1, \quad (18)$$

где  $R = D^2 / (4H)$  — радиус кривизны в вершине днища.

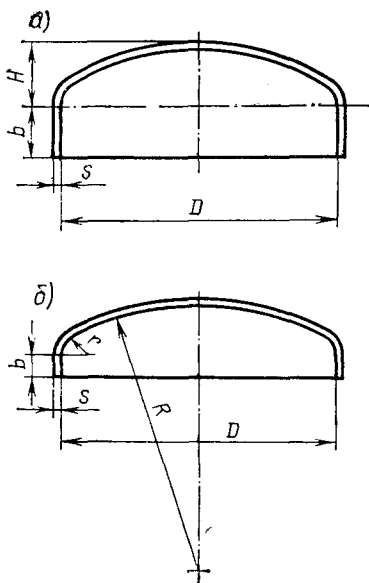


Рис. 19. Эллиптическое (а) и коробовое (б) днища

Для стандартных днищ  $R=D$ . Стальные днища диаметром до 1600 мм изготавливают штампованными из цельного листа, для них  $\varphi=1$ . Раньше вместо эллиптических днищ применяли коробовые (сферические отбортованные), имеющие шаровую поверхность, края которой отбортованы (рис. 19, б). Они менее совершенны, чем эллиптические, так как в линии перехода между сферической и отбортованной частью возникают значительные изгибающие напряжения. В настоящее время их изготавливают очень редко. Толщина стенки сферических отбортованных днищ

$$s = pDy / (4[\sigma]\varphi) + c + c_1, \quad (19)$$

где  $y$  — коэффициент формы днища, который определяют по графику, изображенному на рис. 20, в зависимости от отношения  $r/R$ .

**Конические днища.** Их применяют в тех случаях, когда необходимо перейти от цилиндрической части одного диаметра к цилиндрической части другого диаметра и в вертикальных аппаратах при работе с сыпучими материалами. Коническая форма днища облегчает удаление этих материалов. Наиболее распространены конические днища с углом у вершины  $2\alpha=60$  и  $90^\circ$ , применяют также днища с углом  $2\alpha=120$  и  $140^\circ$ .

Конические днища делают, как правило, с отбортованным краем, что существенно снижает местные напряжения (рис. 21), обычно радиус отбортовки  $r=0,15D$ .

Допускается применение неотбортованных конических днищ и конических переходов для аппаратов, подведомственных Госгортехнадзору, при угле  $2\alpha \leq 45^\circ$  и для остальных сосудов и аппаратов при  $2\alpha \leq 60^\circ$ .

Толщина стенки конической части отбортованного конического днища

$$s = pD_p / \{(2[\sigma]\varphi - p) \cos \alpha\} + c + c_1, \quad (20)$$

где  $D_p = D + 2[r(1 - \cos \alpha) + 10 \sin \alpha]$  — диаметр линии перехода между конической и отбортованной частями (рис. 21) (для днищ без отбортовки  $D_p = D$ );  $\alpha$  — угол между осью и образующей конуса.

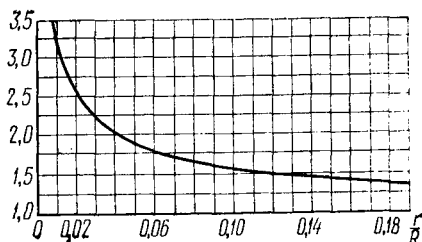


Рис. 20. График для определения коэффициента перенапряжения коробового днища

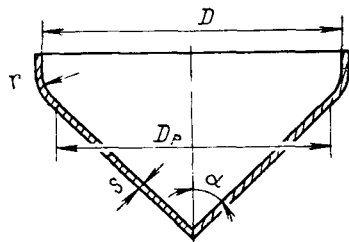


Рис. 21. Коническое днище с отбортовкой

$$s = p D y_k / (4 [\sigma] \varphi) + c + c_1, \quad (21)$$

где  $D$  — диаметр днища у основания;  $y_k$  — коэффициент формы днища, определяемый по графику, изображенному на рис. 22, в зависимости от отношения радиуса отбортовки к диаметру  $r/D$  и угла  $\alpha$ .

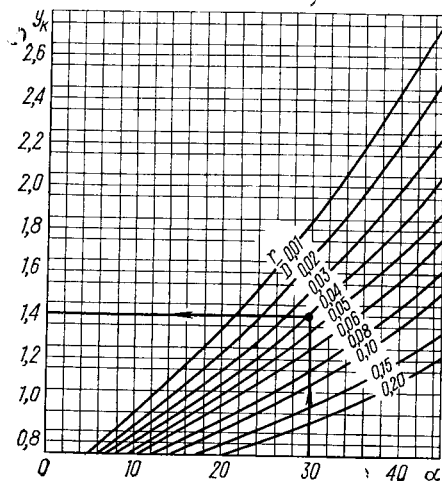


Рис. 22. График для определения коэффициента формы конического отбортованного днища

Для неотбортованных днищ условно принимают  $r=0,01D$ . В большинстве случаев днище изготовляется из листов одинаковой толщины; тогда из двух значений, полученных по (20) и (21), принимают наибольшее. Данные формулы применимы при  $\alpha < 70^\circ$ .

Толщина днища с большим углом у основания ( $\alpha > 70^\circ$ )

$$s = 0,3(D-r) \frac{\alpha}{90} \sqrt{\frac{p}{[\sigma] \varphi}} + c + c_1. \quad (22)$$

**Тарельчатые днища.** Тарельчатые, или сферические неотбортованные, днища представляют собой сферический сегмент, приваренный без всякой отбортовки к цилиндрической обечайке или к фланцу. При соединении тарельчатого днища и обечайки имеет место перелом меридиональной кривой, из-за чего возникают значительные краевые моменты и силы. Такие днища не применяют в ответственной аппаратуре, работающей под давлением свыше  $0,07 \text{ Н/мм}^2$  и подлежащей контролю Госгортехнадзора. Для компенсации распорных сил в местах сопряжения приваривают кольца жесткости. Съемные тарельчатые крышки с фланцем (рис. 23) диаметром до  $800 \text{ мм}$  применяют и в аппаратах под давлением. Фланец можно рассматривать в данном случае как кольцо жесткости.

На рис. 24 даны графики для определения меридиональных напряжений вблизи места приварки тарельчатых днищ к обечайке. Графики составлены для днищ разной толщины при избыточном давлении  $p=0,1 \text{ Н/мм}^2$ . Если рабочее давление отличается от  $0,1 \text{ Н/мм}^2$ , то искомое напряжение находят путем умножения напряжения, определенного по графику, на величину рабочего давления.

Расчет выпуклых днищ на действие наружного давления. Рассчитывают эллиптические днища на устойчивость под действием наружного давления по выражениям

$$s = \frac{k_3 R}{300} \sqrt{\frac{p}{10^{-6} E}} + c + c_1; \quad s = \frac{p R}{2[\sigma]} \beta_1 + c + c_1, \quad (23)$$

где  $k_3$  — коэффициент, определенный по графику, показанному на рис. 25, в зависимости от отношений  $H/D$  и  $R/(s-c-c_1)$ ;  $R$  — ради-

ус кривизны в вершине днища;  $E$  — модуль упругости;  $r_1 = 0,5$

$$+ \sqrt{0,25 + 12k_3^2 \frac{\sigma_T}{E} \frac{[\sigma]}{p}}.$$

Толщине  $s$  стенки задают предварительное значение, а затем сравнивают с результатом расчета. По этой же формуле можно рассчитывать и полушаровые днища, рассматривая их как частный случай эллиптических и принимая  $H/D=0,5$  (из двух значений  $s$  принимают наибольшее).

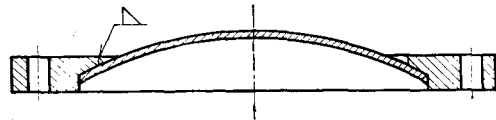


Рис. 23. Тарельчатая крышка с фланцем

Конические днища рассчитывают на наружное давление так же, как и короткие цилиндрические обечайки, принимая за расчетную длину  $L$  высоту конуса, за расчетный диаметр  $D = (0,9D_1 + 0,1 D_0) / \cos \alpha$ , где  $D_1$  и  $D_0$  — диаметры большего и меньшего оснований конуса.

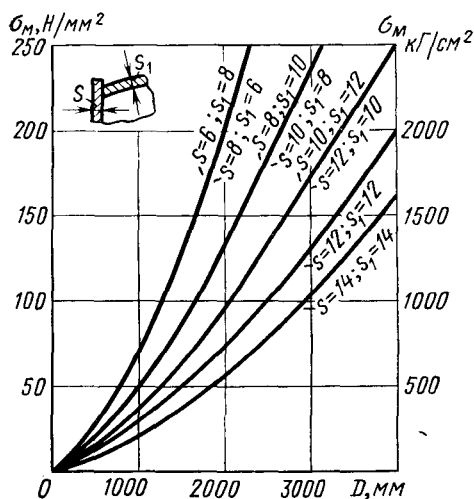


Рис. 24. График для определения напряжений в приварных тарельчатых крышках

**Плоские днища и крышки.** Плоские днища просты по конструкции, для их изготовления не требуется специального прессового оборудования. Однако при больших диаметрах и значительных давлениях толщина их получается весьма большой, поэтому применение их ограничено. Плоские днища диаметром более 500 мм для сосудов и аппаратов

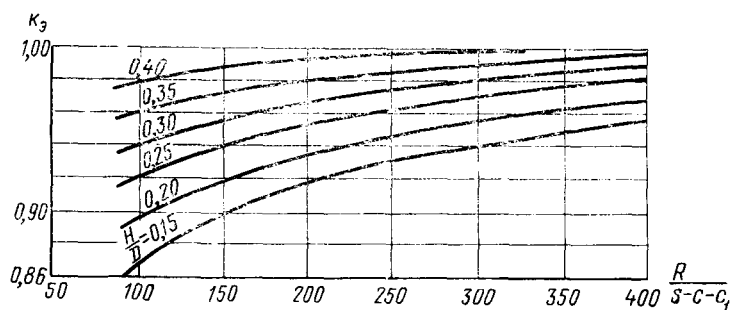


Рис. 25. График для расчета эллиптических днищ на устойчивость

под давлением не применяют. Плоские днища и крышки используют для люков и заглушек, а также для вертикальных емкостных аппаратов под наливом и толстостенных аппаратов высокого давления, у которых толщина стенки очень велика (иногда равна высоте выпуклого днища).

Присоединяют плоские днища к корпусу по одному из вариантов, показанных на рис. 26. Приварка по вариантам *I, II, III* наиболее проста, но ненадежна и для аппаратов под давлением не рекомендуется. Более совершенная приварка по вариантам *IV, V, VI*. Надежнее всего соединение плоского днища с цилиндрической

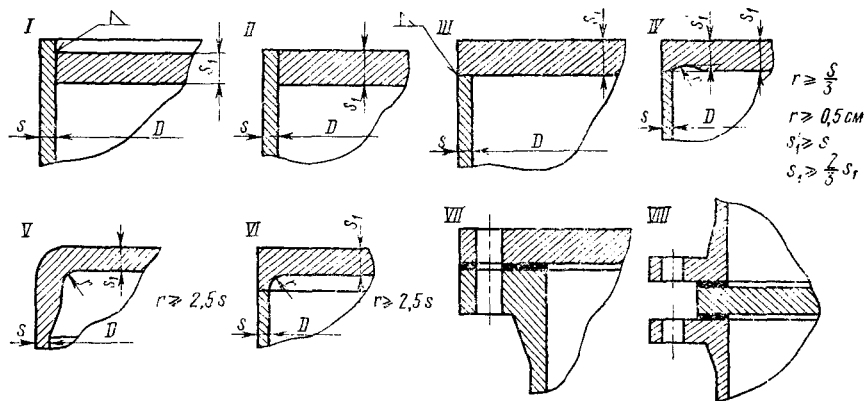


Рис. 26. Варианты присоединения плоских днищ к обечайке и значения коэффициента конструкции днища  $K$

обечайкой с помощью отбортовки (вариант *V*), но изготовление днищ с отбортовкой более сложно. Отъемные крышки присоединяются с помощью фланцевого соединения (варианты *VII—VIII*).

Плоская круглая крышка представляет собой пластину, равномерно нагруженную давлением. В ней возникают значительные изгибающие напряжения. Так, у пластины с жестко защемленными краями наибольшие напряжения  $\sigma_{изг} = 0,75pr^2/s^2$ .

Соединение крышки с обечайкой нельзя рассматривать как абсолютно жесткое. Подставляя вместо коэффициента 0,75 коэффициент  $K$ , зависящий от способа закрепления крышки, после преобразований получают выражение для расчета плоских крышек

$$s = KD \sqrt{p/[\sigma]} + c + c_1, \quad (24)$$

где  $K$  — коэффициент конструкции днища, его значение определяют по графикам, показанным на рис. 26, в зависимости от способа закрепления крышки;  $D$  — диаметр аппарата.

Плоские днища больших диаметров иногда укрепляют ребрами жесткости. В расчетную формулу в этом случае подставляют  $K=0,5$  и диаметр наибольшей окружности, вписанной между ребрами.

**Фланцы.** Это наиболее распространенные разъемные соединения аппаратов и трубопроводов. Они служат для соединения отдельных частей аппаратов: съемных крышек, отдельных царг, люков и др. Ответственная часть фланцевого соединения — узел уплотнения. Различают уплотнения с пластической деформацией уплотняющих элементов и соединения с упругой деформацией. В наиболее распространенных соединениях с пластической деформацией уплотнение достигается тем, что значительно более мягкая, чем основной материал фланца, прокладка деформируется при затягивании соединения и заполняет все неровности на уплотнительной (привалочной) поверхности фланцев. Соединения с упругой деформацией требуют тщательной обработки уплотнительных поверхностей. Их применяют значительно реже, как правило, при повышенных давлениях. Герметичность соединения возрастает с увеличением удельного давления, действующего на прокладку. Чем меньше ширина прокладки, тем больше удельное давление при одной и той же силе сжатия, поэтому прокладки для соединений высокого давления делают более узкими.

Конструктивно просты фланцы с плоской уплотнительной поверхностью (рис. 27, а). Уплотнительные поверхности обрабатывают, однако излишняя шлифовка поверхностей не допускается. Иногда на поверхности нарезают несколько кольцевых канавок треугольного сечения, которые заполняются при затягивании соединения материалом прокладки.

Находят применение фланцы с выступом-впадиной (рис. 27, б). Это соединение не имеет существенных преимуществ и применяется лишь когда необходимо обеспечить соосность соединения. Более надежно соединение «шип-паз» (рис. 27, в), которое используют при повышенных давлениях, работе с ядовитыми веществами и глубоком вакууме, т. е. в более ответственных соединениях. В соединении «шип-паз» прокладка укладывается в кольцевую канавку и

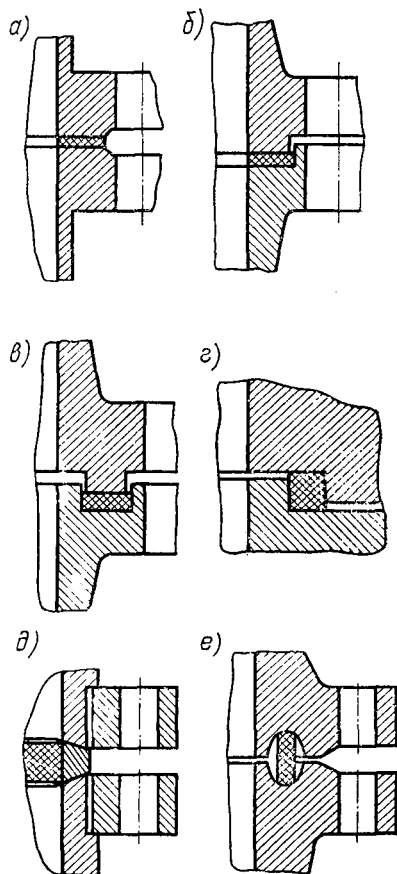


Рис. 27. Типы уплотнительных поверхностей фланцевых соединений

уплотняется сверху кольцевым выступом другого фланца. Она не имеет возможности деформироваться и выдерживает значительные удельные давления. Существенный недостаток соединения «шип-паз» — трудность замены прокладки, которую приходится вырубать зубилом из паза.

Соединение «в замок» (рис. 27, *г*) можно рассматривать как вариант соединения «шип-паз». Его применяют обычно при высоких давлениях. Преимущество этого соединения — большее удобство при смене прокладки.

Для неядовитых малоагрессивных сред при давлениях не более  $0,1 \text{ Н/мм}^2$  используют соединения с прокладкой в пазу. Это уплотнение применяют в основном в узлах, подвергающихся частой разборке, например в люках. Паз фиксирует прокладку и не дает ей пасть.

Из соединений с жесткими металлическими прокладками широко распространены линзовые с прокладкой из качественной углеродистой или легированной стали (рис. 27, *д*). Соприкасаются шаровые поверхности линзы с коническими поверхностями уплотняемых деталей по кольцевой линии. Под действием осевых сил в месте касания возникает узкий пояс деформации материала, который обеспечивает уплотнение. Уплотнения с упругой деформацией обеспечивают многократную сборку и разборку. Линзы и соприкасающиеся с ней поверхности тщательно обрабатывают и шлифуют. Такие уплотнения применяют для соединений с диаметром 300 мм при давлении до  $80 \text{ Н/мм}^2$ . Они широко используются в технике высоких давлений.

В нефтеперерабатывающей промышленности применяют соединения с овальными металлическими прокладками (рис. 27, *е*). Их изготавливают на давление до  $16 \text{ Н/мм}^2$ .

По конструкции и способу соединения со штуцером или корпусом различают следующие основные типы фланцев: плоские приварные; с утолщением у основания (с «шейкой»); свободные на отбортовке и бурте. Каждый из этих основных типов фланцев имеет свои различные конструктивные модификации. Наиболее просты по конструкции плоские фланцы. Их применяют для стальных аппаратов и трубопроводов на давление до  $2,5 \text{ Н/мм}^2$ . Реже их применяют для аппаратов из цветных металлов и пластмасс.

Наиболее распространена приварка фланца по типу, показанному на рис. 28, *а*. Исполнение (рис. 28, *б*) позволяет несколько уменьшить диаметр прокладки и болтовой окружности. Плоские фланцы имеют как плоские привалочные поверхности, так и в исполнении «выступ-впадина» и «шип-паз». При работе с коррозионными средами в целях экономии дефицитного металла фланцы изготавливают из углеродистой стали и защищают накладкой из кислотостойкой стали (рис. 28, *в*). Основным недостатком плоских фланцев — малая жесткость у основания.

При повышенных давлениях или более высоких требованиях к герметичности соединения применяют фланцы с «шейкой». Утолще-

ние у основания фланца делает его более жестким. Фланцы с «шейкой», так же как и плоские, могут иметь привалочные поверхности — плоские, «выступ-впадина» и «шип-паз», причем применение уплотнений «шип-паз» с данным типом фланца более обосновано, чем с плоским фланцем. Из фланцев с шейкой наиболее распространены стальные фланцы, приваренные встык (рис. 28, г), которые также могут быть изготовлены с накладками из кислотоустойчивой стали. Фланцы, приваренные встык, могут применяться и с металлическими прокладками. Находят применение фланцы с шейкой, сваренные из двух частей — тарелки фланца и втулки

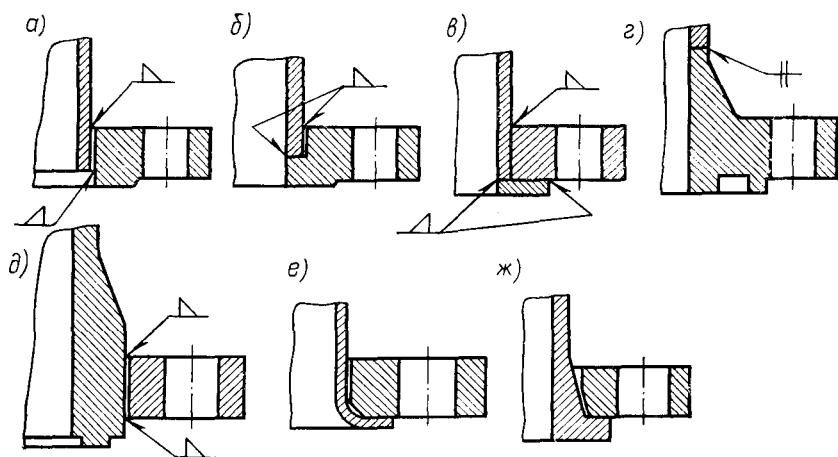


Рис. 28. Основные типы фланцев

(рис. 28, д). Фланцы стальных и чугунных литых аппаратов отливают заодно с корпусом. Фланцы стальные, приваренные встык, применяют при давлении до  $20 \text{ Н/мм}^2$ .

Стальные свободные фланцы на отбортовке (рис. 28, е) применяют на аппаратах из цветных металлов, из некоторых пластмасс, поддающихся отбортовке, и при необходимости максимально экономить дефицитный конструкционный материал, например титан или высоколегированную сталь. Фланцы на отбортовке применяют для условного давления до  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ .

Фланцы на утолщении (бурте) (рис. 28, ж) делают на аппаратах из стекла, керамики и пластмасс, не поддающихся пластической деформации (например, фаолита), а также при нежелательности сварки патрубка из высоколегированной стали с фланцем, изготовленным из углеродистой стали. Фланцы с буртом, укрепленным шейкой, применяют до весьма значительных давлений.

Фланцы на резьбе, находившие ранее значительное применение, в настоящее время почти вышли из употребления в связи с распространением сварки. Их применяют на трубопроводах высокого дав-

ления, где сварка нежелательна, а также при необходимости снять фланец для разборки узла.

При конструировании стараются уменьшить ширину фланца, чтобы снизить изгибающие моменты у его основания и сделать его более жестким. Стандартные и нормализованные фланцы делят на две группы: для соединения труб и трубопроводной арматуры и для соединения частей аппаратуры. Фланцы для труб и трубопроводной арматуры имеют большие размеры, чем аппаратурные, потому что в качестве исходных данных для конструирования арматурных фланцев принимают наибольшую толщину стенки трубы, соответствующую материалу с наименьшей прочностью. Кроме того, учитывается, что фланцы для арматуры и трубопроводов работают в

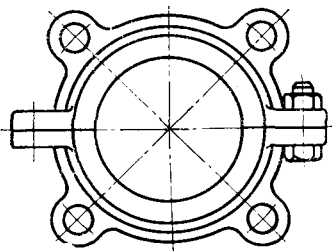


Рис. 29. Разъемный фланец

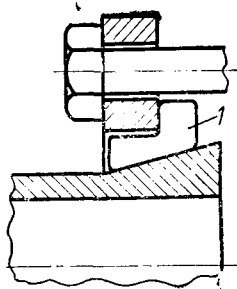


Рис. 30. Фланец с разъемным кольцом

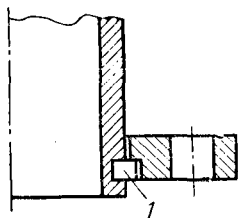


Рис. 31. Фланец с разъемным закладным кольцом

более жестких условиях, так как испытывают дополнительные нагрузки от действия веса трубопроводов, температурных колебаний и других нагрузок.

Для соединения частей аппаратов рекомендуется применять менее металлоемкие аппаратурные фланцы, изготавливаемые диаметрами от 400 мм и более. При диаметре менее 400 мм для соединения частей аппаратов применяют арматурные фланцы.

Специальные типы фланцев. Для соединения трубопроводов и аппаратов из стекла, керамики, ферросилида и других хрупких материалов применяют свободные разборные фланцы. Их выполняют в двух разновидностях: разъемные из двух частей (рис. 29) и с разъемным кольцом (рис. 30). Фланцы из двух частей изготавливают из ковкого чугуна. Обе половины стягивают болтами. Внутри имеется коническое гнездо, которое упирается в коническое утолщение на штуцере. Фланцы данного вида являются типовыми для стеклянных трубопроводов. В соединении с разъемным кольцом фланец имеет диаметр несколько большего размера, чем выступ на конце трубы или цапги, и упирается в кольцо 1, состоящее из двух частей. Разобрав кольцо, можно снять фланец со штуцера. Фланцы с разъемными кольцами проще и дешевле разъемных, но менее компактны. На рис. 31 дана конструкция съемного фланца с

разъемным закладным кольцом, которую иногда применяют на стальных аппаратах, если фланец необходимо снять для разборки узла. Кольцо 1 из двух частей закладывают в кольцевую выточку на поверхности штуцера.

Фланцевые соединения имеют, как правило, круглую форму — наиболее надежную и простую в изготовлении. Однако при необходимости применяют фланцевые соединения с квадратной или прямоугольной формой патрубка. Они сложны в обработке и не всегда обеспечивают необходимую герметичность, поэтому применять их следует только в случае крайней необходимости. Фланцы небольшого диаметра для уменьшения габаритов иногда делают квадратными или овальными.

Для эмалированных аппаратов фланцы делают малых размеров, чтобы уменьшить массу и улучшить температурный режим при обжиге эмали. Для максимального уменьшения размеров такие фланцы выполняют со стяжными скобами (рис. 32). Подобное соединение выдерживает давление  $0,5 \div 0,6$  Н/мм<sup>2</sup>. Скобы устанавливают с очень малым шагом (почти вплотную).

Для соединений, требующих особо высокой герметичности, применяют фланцы с обваркой уплотнительного соединения (рис. 33). Фланцы в таком соединении кончаются тонкими пластинками, которые свариваются швом, не нагруженным осевыми усилиями. При разборке соединения шов срезают, а потом заваривают снова.

Крепежные детали фланцевых соединений. Крепежные детали — весьма ответственные элементы фланцевого соединения, поэтому к ним предъявляется ряд требований в части конструкции и выбора материала. При давлении до  $1,6$  Н/мм<sup>2</sup> и температуре до  $200^\circ\text{C}$  для фланцевых соединений применяют болты, при более высоких температурах и давлениях предпочитают шпильки, снабженные гайками с обеих сторон, так как у головки болтов возникают очень значительные местные напряжения. В аппаратах высокого и повышенного давления шпильки делают с проточкой в ненарезанной части, равной внутреннему диаметру резьбы, чтобы уменьшить местные напряжения. Шаг по болтовой окружности стремятся сделать меньшим, чтобы повысить герметичность соединения. Обычно его принимают равным  $(2,5 \div 4)d$  ( $d$  — наружный диаметр резьбы). Однако при очень тесном расположении бол-

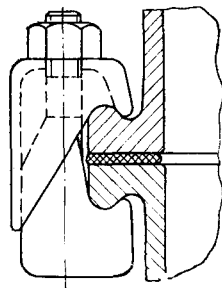


Рис. 32. Фланцевое соединение со стяжными скобами

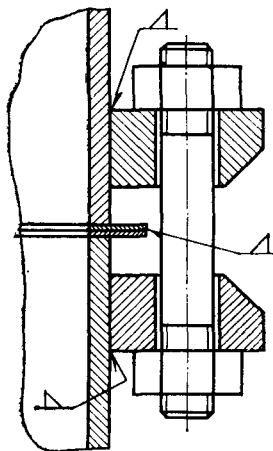


Рис. 33. Фланцевое соединение со сварными пластинами

тов сборка соединения затрудняется и возможна только с помощью торцовых ключей. Чем выше давление в аппарате, тем меньшим принимают отношение шага к диаметру болта (шпильки). Одно и то же фланцевое соединение можно конструировать с малым числом болтов большого диаметра или со значительным количеством небольших болтов. Чем меньше диаметр болтов, тем меньше, как правило, размер фланца, однако необходимо иметь в виду, что диаметр болтов (шпилек) менее  $10 \div 12$  мм применять не следует. Число болтов обычно принимают кратным четырем.

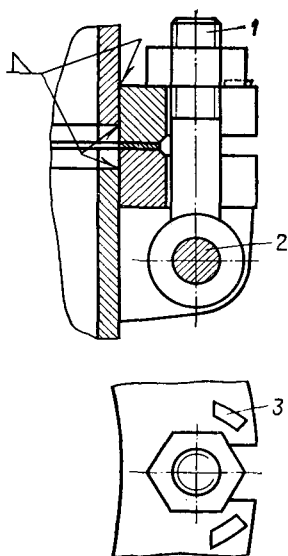


Рис. 34. Фланцевое соединение с откидными болтами

Для соединений, требующих постоянной разборки, применяя откидные болты (рис. 34), которые крепят на отдельной оси 2 или на общем кольцевом стержне. Число откидных болтов стремятся по возможности уменьшить за счет увеличения их диаметра. Для того чтобы исключить опасность самопроизвольного соскакивания болта 1 с фланца, к фланцу приваривают упоры 3.

К материалам крепежных деталей предъявляют повышенные требования. Их выполняют, как правило, из качественных углеродистых и легированных сталей с соответствующей термообработкой. Гайки, болты и шпильки изготовляют из сталей разных марок, причем прочность и твердость болтов (шпилек) должна быть выше, чем гаек. Если рабочая температура превышает  $100^\circ\text{C}$ , то крепежные детали легированных (аустенитных) сталей следует делать из того же материала во избежание температурных напряжений.

**Типы прокладок.** Материал и форму прокладки выбирают в зависимости от давления, температуры и свойств уплотняемой среды. Прокладка должна обладать химической стойкостью и термостойкостью, а также иметь достаточную пластичность, обеспечивающую ее деформацию при уплотнении фланцевого соединения. В соединениях, подвергающихся постоянной сборке и разборке, необходимо иметь прокладки, сохраняющие свои качества.

В зависимости от материала прокладки делят на неметаллические, металлические и комбинированные.

**Неметаллические прокладки.** Изготавливают из резины, паронита, асбеста, полихлорвинила, фторопласта и некоторых других полимерных материалов. Резиновые прокладки применяют для небольших давлений и температур (не более  $50 \div 70^\circ\text{C}$ ). Имеются также специальные сорта морозостойкой и маслостойкой резины. Резина для прокладок имеет вид листов или шнуров круглого и прямоугольного сечения. Иногда используют резиновые прокладки сложной формы.

Весьма распространенный прокладочный материал — паронит. Он представляет собой композицию, состоящую из асбеста, каучука и различных наполнителей. Паронит выпускают в виде листов. Прокладки из паронита применяют при температурах до  $450^{\circ}\text{C}$  и давлениях  $6\text{ Н/мм}^2$  в самых различных средах — горячей воде, водяном паре, различных кислотах и растворителях. Он стоек в азотной и серной кислоте, во многих растворителях (бензине, бензоле и др.) и средах.

Асбест для прокладок используют в виде шнура или листового материала (асбестовый картон). Прокладки из него обладают высокой термостойкостью (до  $500^{\circ}\text{C}$ ) и кислотостойкостью. Его выпускают нескольких сортов, наиболее высокой стойкостью к воздействию кислот обладает голубой асбест.

Хороши прокладки из полимерных материалов. Среди них следует отметить полихлорвиниловый пластикат и фторопласт-4. Полихлорвиниловый пластикат — эластичный материал, получаемый вальцеванием смеси полихлорвиниловой смолы с различными пластификаторами. Он обладает высокой химической стойкостью в большинстве кислот и может применяться до значительных давлений, но термостойкость его невелика (не более  $50\div 60^{\circ}\text{C}$ ). Он нестойк и в органических растворителях. Фторопласт-4 благодаря своей высокой химической стойкости и термостойкости во многих случаях незаменимый прокладочный материал. Малая пластичность ограничивает его применение при низких давлениях.

Прокладки из резины, паронита, асбеста и фторопласта наиболее часто изготавливают плоскими, для чего используют листы соответствующих материалов. Прокладки большего диаметра, которые нельзя вырезать из цельного листа, делают составными, реже применяют резиновые и асбестовые прокладки из шнурового материала. Находят применение и фасонные прокладки из указанных материалов, например резиновые прокладки зубчатого сечения.

**Металлические прокладки.** Применяют при повышенных и высоких давлениях. Для них используют металлы, обладающие достаточной пластичностью: медь, алюминий, мягкое (малоуглеродистое) железо, реже никель и свинец. Линзовые и овальные прокладки, работающие по принципу упругой деформации, изготавливают из качественной углеродистой и легированной стали.

**Комбинированные прокладки.** Они состоят из металлических и неметаллических материалов, которым металлическая армировка придает жесткость, а более пластичный неметаллический наполнитель обеспечивает герметичность соединения. Широко применяют асбометаллические прокладки. Комбинированные прокладки имеют разную конструкцию, например: асбест, армированный проволокой 2 (рис. 35), спиральный витой металл с асбестовым заполнением, тонколистовой металл с прослойками асбеста, резины или паронита и др. Для агрессивных сред применяют комбинированные прокладки с фторопластовым чехлом 3 (рис. 35), они состоят из металлической или паронитовой сердцевины, промежуточного слоя из мягкого материала и тонкой фторопластовой обкладки.

**Выбор и расчет фланцевых соединений.** Фланцы, как и все детали массового изготовления, нормализованы, поэтому задача заключается обычно в выборе фланцевого соединения по ГОСТам и нормам в зависимости от рабочих параметров. Размеры фланцевого соединения определяются двумя величинами — условным проходом  $D_y$  и условным давлением  $p_y$ . Условный проход связан с диаметром обечайки или трубы, но не всегда им соответствует. Обычно несколько близких по размерам диаметров труб связывают с определенным условным проходом. Условное давление

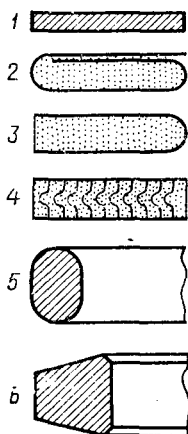


Рис. 35. Основные типы прокладок:  
1 — плоская; 2 — комбинированная асбесто-металлическая; 3 — асбестовая с фторопластовым чехлом; 4 — комбинированная; 5 — овальная; 6 — линзовая

выбирают в зависимости от рабочего давления, температуры и свойств среды. Если температура не превышает  $200^\circ\text{C}$  и среда в аппарате нетоксичная, то условное давление не превышает рабочее. При более высоких температурах условное давление выше рабочего; чем выше температура, тем больше условное давление превышает рабочее. Если фланцы изготовлены из жаростойкой стали, то это превышение менее значительно. Давления условные и рабочие для стальных трубопроводных фланцев и арматуры (по ГОСТ 356—68) даны в табл. 9.

Во многих случаях решающим обстоятельством является не прочность, а герметичность фланцевого соединения, поэтому при работе под вакуумом (при остаточном давлении менее 20 мм рт. ст.) и при работе с сильнодействующими ядовитыми веществами применяют фланцы, имеющие  $p_y \geq 1,6 \text{ Н/мм}^2$ . При конструировании штуцеров аппаратов применяют фланцы, имеющие  $p_y \geq 1,0 \text{ Н/мм}^2$ , так как трубопроводную арматуру, присоединяющуюся к штуцерам, как правило, выпускают на условное давление не ниже  $1,0 \text{ Н/мм}^2$ . Нестандартные фланцы

применяют в тех случаях, когда нет возможности подобрать на заданные параметры фланцевое соединение по ГОСТам или нормам или когда фланцы изготовлены из материалов, прочностные характеристики которых существенно отличаются от стандартных. Тогда необходимо фланцевые соединения рассчитывать. Существует несколько методов расчета, но все они выполняются примерно в одном и том же порядке. Сначала определяют болтовую нагрузку или полное осевое усилие, которое складывается из равнодействующей сил внутреннего давления и усилия, необходимого для деформации прокладки. Затем рассчитывают на прочность крепежные детали и сам фланец. Расчету, как правило, предшествует конструктивная проработка, при которой предварительно определяют диаметр болтовой окружности, размеры прокладки и основные размеры самого фланца. Таким образом, расчет фланцев является, как правило, проверочным. Ниже приведена методика, изложенная в ОСТ 26-373—71 и предназначенная для расчета приварных и сво-

| Марка стали                                | Наибольшая температура среды, °C    |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Ст3; 10; 20;<br>25                         | 200                                 | 250  | 300  | 350  | 400  | 425  | 435  | 445   | 455  | —    | —    | —    | —    |
| 15ГС; 16ГС                                 | 200                                 | 250  | 300  | 350  | 400  | 425  | 435  | 445   | 455  | —    | —    | —    | —    |
| 15ХМ;<br>20ХМЛ                             | 200                                 | 320  | 450  | 490  | 500  | 510  | 515  | 525   | 535  | 545  | —    | —    | —    |
| Х5ВЛ;<br>Х5МЛ                              | 200                                 | 325  | 390  | 430  | 450  | 470  | 490  | 500   | 510  | 520  | 530  | 550  | —    |
| 12Х18Н10Т                                  | 200                                 | 300  | 400  | 480  | 520  | 560  | 590  | 610   | 630  | 640  | 660  | 690  | 700  |
| Условные<br>давления,<br>Н/мм <sup>2</sup> | Рабочие давления, Н/мм <sup>2</sup> |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |
| 0,25                                       | 0,25                                | 0,22 | 0,20 | 0,18 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,11  | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,06 | 0,06 |
| 0,60                                       | 0,60                                | 0,56 | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,36 | 0,32 | 0,28  | 0,25 | 0,22 | 0,20 | 0,16 | 0,14 |
| 1,0                                        | 1,0                                 | 0,90 | 0,80 | 0,70 | 0,64 | 0,56 | 0,50 | 0,45  | 0,40 | 0,36 | 0,32 | 0,25 | 0,22 |
| 1,6                                        | 1,6                                 | 1,40 | 1,25 | 1,10 | 1,00 | 0,90 | 0,80 | 0,70  | 0,64 | 0,56 | 0,50 | 0,40 | 0,36 |
| 2,5                                        | 2,5                                 | 2,20 | 2,00 | 1,80 | 1,60 | 1,40 | 1,25 | 1,10  | 1,00 | 0,90 | 0,80 | 0,64 | 0,56 |
| 4,0                                        | 4,0                                 | 3,60 | 3,20 | 2,80 | 2,50 | 2,20 | 2,00 | 1,80  | 1,60 | 1,40 | 1,25 | 1,00 | 0,90 |
| 6,4                                        | 6,4                                 | 5,60 | 5,00 | 4,50 | 4,00 | 3,60 | 3,20 | 2,80  | 2,50 | 2,20 | 2,00 | 1,60 | 1,40 |
| 10,0                                       | 10,0                                | 9,00 | 8,00 | 7,10 | 6,40 | 5,60 | 5,00 | 4,50  | 4,00 | 3,60 | 3,20 | 2,50 | 2,20 |
| 16,0                                       | 16,0                                | 14,0 | 12,5 | 11,2 | 10,0 | 9,0  | 8,00 | 7,10  | 6,40 | 5,60 | 5,00 | 4,00 | 3,60 |
| 25,0                                       | 25,0                                | 22,5 | 20,0 | 18,0 | 16,0 | 14,0 | 12,5 | 11,20 | 10,0 | 9,00 | 8,00 | 6,40 | 5,60 |
| 32,0                                       | 32,0                                | 28,0 | 25,0 | 22,5 | 20,0 | 18,0 | 16,0 | 14,0  | 12,5 | 11,2 | 10,0 | 8,00 | 7,10 |

бодных фланцев, крышек и царг стальных аппаратов диаметром не менее 400 мм. Равнодействующая сил внутреннего давления (Н)

$$Q_d = D_{с.п}^2 p \pi / 4, \quad (25)$$

где  $D_{с.п}$  — средний диаметр прокладки, мм;  $p$  — расчетное давление, Н/мм<sup>2</sup>.

Реакция прокладки в рабочих условиях (усилие для деформации прокладки)

$$R_n = 2\pi D_{с.п} b_0 m p,$$

где  $b_0$  — расчетная ширина прокладки, мм (табл. 10);  $m$  — прокладочный коэффициент, показывающий, во сколько раз давление на прокладку должно быть больше расчетного давления (табл. 11).

Для аппаратов, работающих при повышенных температурах, определяют также усилие, возникающее от разности температур фланца и болтов в период эксплуатации. Для фланцев, приваренных встык и плоских, температурные усилия (Н)

$$Q_t = \gamma n f_6 E_6 t_{\phi} (\alpha_{\phi} - \alpha_6 k_1), \quad (26)$$

где  $\gamma$  — коэффициент, определяемый по графику, изображенному на

Таблица 10

| Тип прокладки                                                                 | Диаметр аппарата,<br>мм                                                           | Ширина прокладки,<br>мм          |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Плоские неметаллические                                                       | $D \leq 1000$<br>$1000 < D \leq 2000$<br>$D > 2000$                               | 12—15<br>15—25<br>25             |
| Плоские металлические                                                         | $D \leq 1000$<br>$D > 1000$                                                       | 10—12<br>12—15                   |
| Плоские прокладки в металличе-<br>ской оболочке и зубчатые металличе-<br>ские | $D \leq 1600$<br>$D > 1600$                                                       | 12—18<br>13—25                   |
| Овального или восьмиугольного<br>сечения                                      | $D \leq 600$<br>$600 < D \leq 800$<br>$800 < D \leq 1000$<br>$1000 < D \leq 1600$ | 12—18<br>16—22<br>18—28<br>22—42 |

Примечания:

1. Расчетная ширина плоской прокладки  $b_0 = 0,5b$  при  $b \leq 15$  мм;  $b_0 = 1,9\sqrt{b}$  при  $b > 15$  мм.
2. Расчетная ширина овальной или восьмиугольной прокладки  $b_0 = b/8$ .

Таблица 11

| Конструкция прокладки                                      | Материал прокладки                    | Прокладочный<br>коэффициент $m$ | Минимальное<br>удельное<br>давление $q$ ,<br>Н/мм <sup>2</sup> | Допускае-<br>мое удель-<br>ное давле-<br>ние $[q]$ ,<br>Н/мм <sup>2</sup> |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Плоская неметал-<br>лическая                               | Резина                                | 1                               | 4                                                              | 20                                                                        |
|                                                            | Асбест листовой<br>при толщине 1÷3 мм | 2,5                             | 20+ $p$                                                        | 130                                                                       |
|                                                            | Паронит при тол-<br>щине более 1 мм   | 2,5                             | 20+ $p$                                                        | 130                                                                       |
|                                                            | Фторопласт-4 при<br>толщине 1÷3 мм    | 2,5                             | 10                                                             | 40                                                                        |
| Плоская металл-<br>лическая                                | Алюминий марки<br>АД                  | 4                               | 60                                                             |                                                                           |
|                                                            | Латунь марки Л63                      | 4,75                            | 90                                                             |                                                                           |
|                                                            | Сталь 05кп                            | 5,5                             | 125                                                            |                                                                           |
|                                                            | Сталь 08Х18Н10Т                       | 6,5                             | 180                                                            |                                                                           |
| Плоская асбесто-<br>вая в металлической<br>оболочке        | Оболочка из алюми-<br>ния             | 3,25                            | 38                                                             |                                                                           |
|                                                            | из меди или лату-<br>ни               | 3,5                             | 46                                                             |                                                                           |
|                                                            | из стали 05 кп                        | 3,75                            | 53                                                             |                                                                           |
|                                                            | из стали<br>08Х18Н10Т                 | 3,75                            | 63                                                             |                                                                           |
| Металлическая<br>овального или вось-<br>мигранного сечения | Сталь 05КГ                            | 5,5                             | 125                                                            |                                                                           |
|                                                            | Сталь 0Х13                            | 5,5                             | 125                                                            |                                                                           |
|                                                            | Сталь                                 | 6,5                             | 180                                                            |                                                                           |
|                                                            | 08Х18Н10Т                             |                                 |                                                                |                                                                           |

Примечание. Для сред с высокой проникающей способностью (водород, гелий, легкие нефтепродукты и др.)  $q$  не ниже 35 Н/мм<sup>2</sup>.

рис. 36;  $n$  — количество болтов (шпилек);  $f_6$  — площадь поперечного сечения болта или шпильки по внутреннему диаметру резьбы (если шпилька имеет проточку меньшую, чем внутренний диаметр резьбы, то в расчет принимается данный размер), мм<sup>2</sup>;  $E_6$  — модуль упругости материала болтов (шпилек) при расчетной температуре, Н/мм<sup>2</sup>;  $t_\phi$  — расчетная температура фланцев;  $\alpha_\phi$ ,  $\alpha_6$  — коэффициенты линейного расширения соответственно материала фланца и болтов (шпилек), °С<sup>-1</sup>;  $k_1 = t_6/t_\phi$  — коэффициент, определяемый по табл. 12.

Для свободных фланцев (26) примет вид

$$Q_t = 0,97 \gamma n f_6 E_6 t_\phi' (\alpha_\phi - \alpha_6 k_1). \quad (27)$$

Кроме того, учитываются дополнительные внешние нагрузки, приложенные к фланцевому соединению, которые могут вызвать в нем изгибающий момент  $M$  (Н·мм). Суммарная болтовая нагрузка фланцевых соединений для рабочих условий

$$P_{62} = Q_n + R_n + Q_t + 4M/D_{c.n} \quad (28)$$

в условиях монтажа (при затяжке соединения)

$$\{P_{61} = \xi(\alpha Q_n + R_n) + 4M/D_{c.n}; \quad (29)$$

$$\{P_{61} = \pi b_0 D_{c.n} q, \quad (30)$$

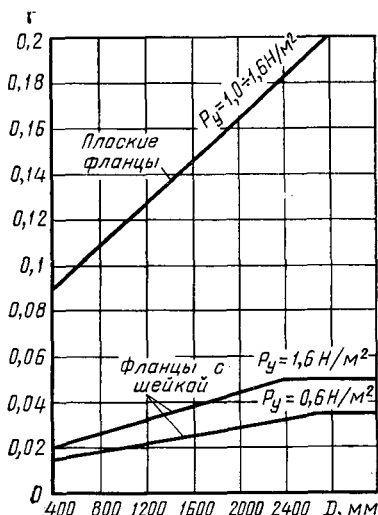


Рис. 36. График для определения коэффициента  $\gamma$

Таблица 12

| Тип фланца                  | Температура фланца $t_\phi$ , °С | Температура болта $t_6$ , °С |                           | $k_1$                       |                           |
|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                             |                                  | для неизолированных фланцев  | для изолированных фланцев | для неизолированных фланцев | для изолированных фланцев |
| Приваренные встык и плоские | 1,00                             | 0,95                         | 0,97                      | 0,95                        | 0,97                      |
| Свободные                   | 0,97                             | 0,90                         | 0,90                      | 0,93                        | 0,93                      |

где  $\xi = [\sigma]_{20^\circ \text{фл}} / [\sigma]_{t_\phi \text{фл}}$  или  $\xi = [\sigma]_{20^\circ \text{б}} / [\sigma]_{t_6 \text{б}}$  — коэффициент, наименьший из этих двух величин;  $[\sigma]_{20^\circ \text{фл}}$ ;  $[\sigma]_{20^\circ \text{б}}$  — допускаемые напряжения при 20° С соответственно для фланцев и болтов (шпилек) (табл. 13);  $[\sigma]_{t_\phi \text{фл}}$ ,  $[\sigma]_{t_6 \text{б}}$  — допускаемые напряжения для фланцев и болтов при расчетной температуре;  $\alpha$  — коэффициент, определяемый по табл. 14;  $q$  — удельное давление (см. табл. 11), необходимое для первоначального уплотнения прокладки.

Таблица 13

| Температура, °С | Марка стали |                          |             |              |         |         |
|-----------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------|---------|---------|
|                 | ВСт5        | 12Х18Н10Т<br>10Х17Н13М2Т | 35Х<br>35ХА | 37Х12Н8Г8МФБ | 12Х2М1Ф | 20ХМФБР |
| 20              | 130         | 110                      |             | 230          | 230     | 230     |
| 100             | 126         | 105                      |             | 230          | 230     | 230     |
| 200             | 120         | 98                       |             | 225          | 225     | 225     |
| 250             | 107         | 95                       |             | 222          | 220     | 220     |
| 300             | 97          | 90                       |             | 220          | 215     | 215     |
| 350             | 86          | 86                       |             | 185          | 215     | 215     |
| 375             | 80          | 85                       |             | 175          | 210     | 210     |
| 400             | 75          | 83                       |             | 160          | 210     | 210     |
| 425             | 68          | 82                       |             |              | 195     | 195     |
| 450             |             | 80                       |             |              | 180     | 180     |
| 475             |             | 79                       |             |              | 165     | 165     |
| 500             |             | 78                       |             |              | 150     | 150     |
| 520             | ...         | 78                       |             | ...          | 150     | 150     |
| 540             | ...         | ...                      |             | ...          | 75      | 105     |
| 550             | ...         | ...                      |             | ...          | 64      | 90      |

Таблица 14

| Тип фланца        | Давление условное,<br>Н/мм²   | Диаметр фланца, мм | $\alpha$           |
|-------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| Плоские           | До 0,6                        | $D \leq 1200$      | 1,3                |
|                   |                               | $D > 1000$         | 1,1                |
|                   | $1,0 \leq p_y \leq 1,6$       | $D \leq 1000$      | 1,5                |
|                   |                               | $D > 1000$         | 1,35               |
|                   | До 1,0                        | $D \leq 1000$      | 1,1                |
|                   |                               | $D > 1000$         | 1,25               |
| Приваренные встык | $1,0 \div 1,6$                | $D \leq 1500$      | 1,1                |
|                   |                               | $D > 1500$         | 1,1                |
|                   | 2,5<br>4,0<br>$6,4 \div 10,0$ | $D \leq 2000$      | 1,2                |
|                   |                               |                    | 1,2<br>1,2<br>1,25 |

Примечание. Для фланцев с резиновыми прокладками, с прокладками восьмиугольного сечения, а также для свободных фланцев независимо от материала прокладки  $\alpha=1$ .

Величину  $P_{61}$  принимают по наибольшему из значений, определенных по (29) и (30), но при использовании мягких прокладок типа паронита или фторопласта-4; фактическое удельное давление на прокладку не выше наибольшего допустимого:

$q = \frac{P_{61}}{\pi D_{с.п} b_0} \leq [q]$ . Значение  $[q]$  определяют по табл. 11. При условном давлении менее 0,6 Н/мм<sup>2</sup> болтовая нагрузка  $P_{61} \geq [\sigma]_6 n f_6$ , где  $[\sigma]_6$  принимается меньшей из двух величин: 0,4  $[\sigma]_{20^\circ 6}$  и 110 Н/мм<sup>2</sup>. После определения болтовой нагрузки проверяют болты на прочность: в рабочих условиях

$$P_{62}/(n f_6) \leq [\sigma]_{t6}; \quad (31)$$

в условиях монтажа

$$P_{61}/(n f_6) \leq [\sigma]_{t 20^\circ C}. \quad (32)$$

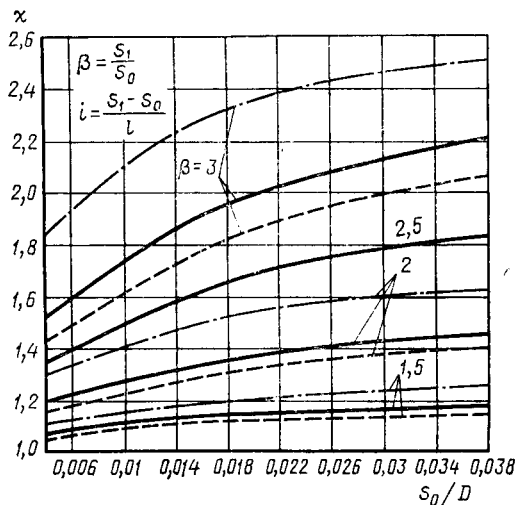


Рис. 37. График для определения коэффициента  $\psi$ :  
 - - - -  $i=1/2,5$ ; —  $i=1/3$ ; -.-  $i=1/5$

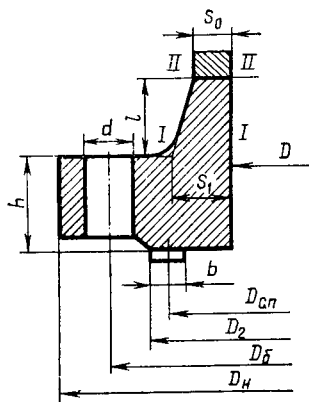


Рис. 38. К расчету фланцев на прочность

Расчет самого фланца на прочность начинают с определения приведенного изгибающего момента (принимают наибольшее из двух значений) для приваренных фланцев (рис. 28, а, б):

$$M_0 = P_{61} (D_6 - D_{с.п})/2 \text{ или } M_0 = 0,5 [P_{62} (D_6 - D_{с.п}) + Q_{\lambda} (D_{с.п} - D - s_3)] [\sigma]_{\text{фл } 20^\circ} / [\sigma]_{\text{фл } t};$$

для свободных фланцев для бурта:

$$M_0 = P_{61} (D_s - D_{с.п})/2 \text{ или } M_0 = 0,5 [P_{62} (D_s - D_{с.п}) + Q_{\lambda} (D_{с.п} - D - s_3)] [\sigma]_{\text{фл } 20^\circ} / [\sigma]_{\text{фл } t}; \quad (34)$$

для кольца:

$$M_0 = P_{61} (D_6 - D_s)/2 \text{ или } M_0 = P_6 0,5 (D_6 - D_s) [\sigma]_{\text{фл } 20^\circ} / [\sigma]_{\text{фл } t}, \quad (35)$$

где  $D_6$  — диаметр болтовой окружности;  $D_s$  — диаметр крайней точ-

ки бурта, соприкасающейся с кольцом свободного фланца;  $s_3$  — эквивалентная толщина втулки, равная для плоских фланцев толщине стенки аппарата, для фланцев с шейкой  $s_3 = s\chi$ ;  $\chi$  — коэффициент, определяемый по графику, изображенному на рис. 37.

Затем выбирают предварительно толщину фланца  $h$  и проверяют условия прочности (рассматривается сложное напряжение состояния фланца). Во втулке фланца или бурта максимальные напряжения у основания втулки (сечение  $I-I$  на рис. 38)

$$\sigma_1 = 1,9M_0\omega/[D(s_1 - c)^2], \quad (36)$$

где  $\omega = 1/[1 + 0,9\lambda(1 - \psi_1 j^2)]$ ;  $\lambda = h/\sqrt{Ds_3}$ ;  $j = h/s_3$ ;

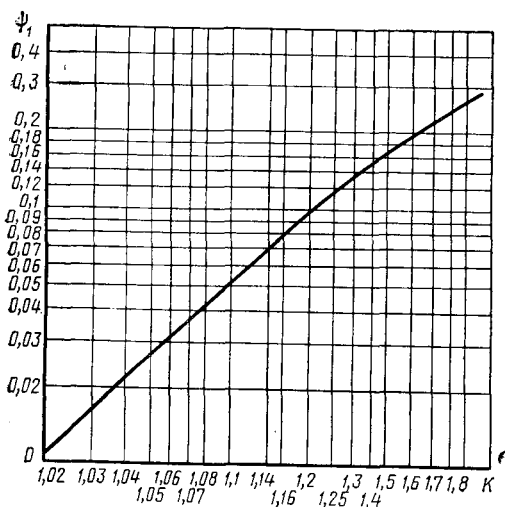


Рис. 39. График для определения коэффициента  $\psi_1$

коэффициент, определяемый по графику, данному на рис. 41, в зависимости от значения  $K$ .

Кольцевые напряжения в кольце свободного фланца

$$\sigma_k = \psi_2 M / (Dh^2); \quad (38)$$

в бурте свободного фланца

$$\sigma_k = \psi_2 M / (Dh^2). \quad (39)$$

Необходимо соблюдать следующие условия прочности:

а) для приварных фланцев и в буртах свободных фланцев: в сечении  $I-I$

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_k^2 + \sigma_1 \sigma_k} \leq [\sigma]; \quad (40)$$

$\psi_1$  — коэффициент, который находят по графику, изображенному на рис. 39, в зависимости от отношения наружного диаметра фланца к внутреннему диаметру аппарата:  $K = D_H/D$ .

У края втулки (сечение  $II-II$  на рис. 38)  $\sigma_2 = f\sigma_{M1}$ . Коэффициент  $f$  определяют по графику, показанному на рис. 40.

Окружное напряжение в кольце приварных фланцев

$$\sigma_k = M_0[1 - \omega(1 - 0,9\lambda)]\psi_2/(Dh^2), \quad (37)$$

где  $D$  — внутренний диаметр аппарата;  $\psi_2$  — коэффициент,

в сечении II—II

$$\sqrt{(\sigma_2 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} + (\sigma_0 + \sigma_m) \sigma_t \leq [\sigma], \quad (41)$$

где  $\sigma_m = pD/[4(s_0 - c)]$  — меридиональное напряжение от внутреннего давления;  $\sigma_t = pD/[2(s_0 - c)]$  — тангенциальное напряжение во втулке от внутреннего давления.

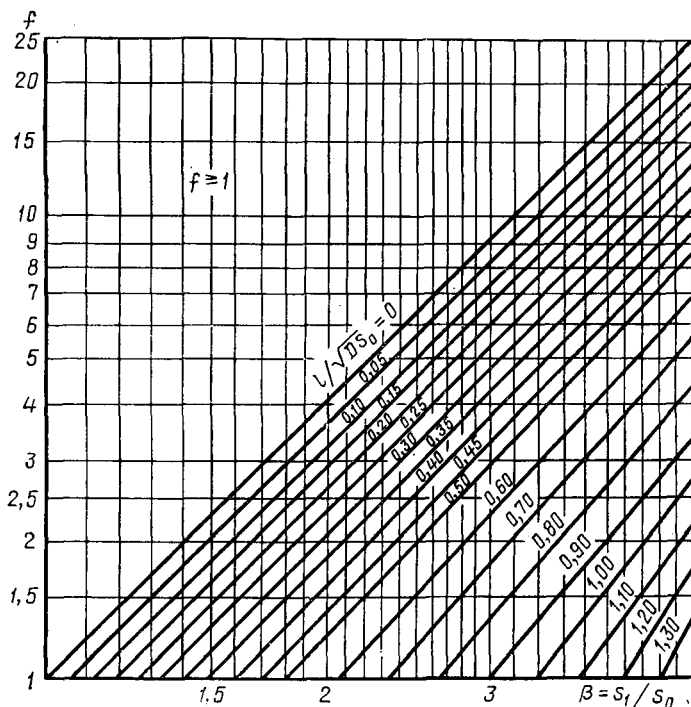


Рис. 40. График для определения коэффициента  $f$

Допускаемое напряжение  $[\sigma]$  в данной методике принимают значительно более высоким, чем по табл. 6. Для основания шейки и тарелки фланца  $[\sigma] = \eta \sigma_t$ ; для конца шейки  $[\sigma] = 3 \cdot 10^{-3} E_{20} \eta$  при  $p_y < 4 \text{ Н/мм}^2$  и  $[\sigma] = 2 \cdot 10^{-3} E_{20} \eta$  при  $p_y \geq 4 \text{ Н/мм}^2$ ;

б) в кольце свободного фланца  $\sigma_k \leq [\sigma]_k$ , где  $[\sigma]_k$  — допускаемое напряжение для материала фланца.

Наряду с прочностью проверяют условия герметичности (жесткости) фланцевого соединения  $\varphi = \sigma_k D / (E_{20} \cdot h) \leq [\varphi]$ , где  $[\varphi]$  — допускаемый коэффициент жесткости (для плоских фланцев  $[\varphi] = 0,013$ ; для фланцев, приваренных встык,  $[\varphi] = 0,009$  при  $D \leq 2000 \text{ мм}$  и  $[\varphi] = 0,013$  при  $D > 2000 \text{ мм}$ ).

Если условия прочности и герметичности не соблюдаются, увеличивают толщину фланца и повторяют расчет. Шаг болтов фланцевого соединения, рассчитываемых по ОСТ 26-373—71, должен

выбираться с учетом рекомендаций, приведенных ниже:

|                                                           |           |              |              |              |              |           |              |
|-----------------------------------------------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|
| Давление $p_y$ , Н/мм <sup>2</sup>                        | 0,3       | 0,6          | 1            | 1,6          | 2,5          | 4         | 6,4 ÷ ÷10    |
| Отношение шага к<br>наружному диа-<br>метру болта . . . . | (4,2 ÷ 5) | (3,8 ÷ ÷4,8) | (3,5 ÷ ÷4,2) | (3,0 ÷ ÷3,8) | (2,7 ÷ ÷3,5) | (2,3 ÷ 3) | (2,1 ÷ ÷2,8) |

Наряду с приведенной методикой расчета фланцевых соединений применяют и другие методы, например метод Уотерса [1, 2]. Фланцы, рассчитанные по данному методу, получаются несколько более массивными, чем по ОСТ 26-373—71.

**Другие типы разъемных соединений.** Наряду с фланцами применяют (ограниченно) резьбовые соединения для труб и различных узлов химических аппаратов. Основные типы резьбовых соединений показаны на рис. 42. В соединениях типа *а*, *в*, *г*, называемых *нипельными*, уплотнение происходит за счет упругой деформации уплотняемых элементов. В соединении типа *б* («штуцерно-торцовое») уплотнение происходит с помощью прокладки. Во всех резьбовых соединениях необходимо предусматривать устройства, позволяющие при вращении одной соединяемой детали удерживать от вращения другую.

В тех случаях, когда требуется быстрый разъем и сборка соединения, применяются байонетные затворы. Фланец крышки байонетного затвора имеет выступы. Аналогичные выступы имеются на поворотном кольце, имеющем П-образное сечение. При открытии затвора кольцо поворачивают таким образом, что выступы кольца оказываются напротив впадин фланца. При запирании соединения

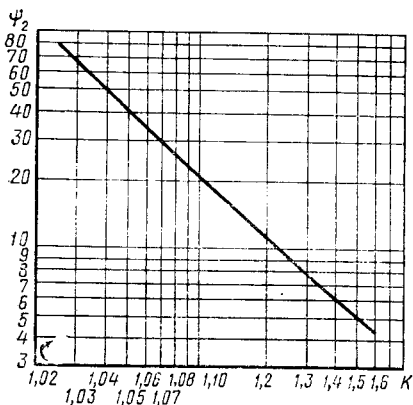


Рис. 41. График для определения коэффициента  $\psi_2$

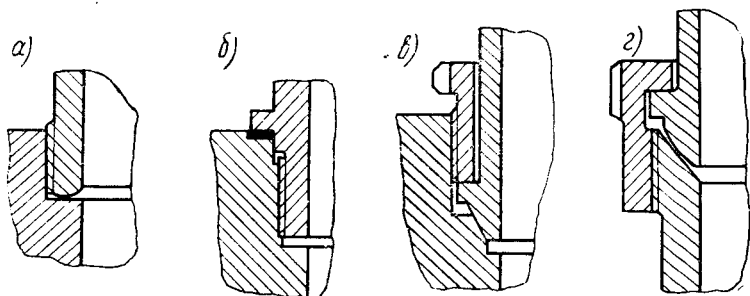


Рис. 42. Основные конструкции резьбовых разъемных соединений

кольцо поворачивается и выступы кольца и фланца входят в соприкосновение. Выступы имеют скошенные поверхности, благодаря чему при повороте кольца фланец крышки прижимается к фланцу корпуса. Байonetные затворы находят применение на крышках вулканизационных котлов.

## § 2.6. Устройства для присоединения трубопроводов и осмотра фланцев

**Штуцера, бобышки и смотровые окна.** Штуцер. Он состоит из короткого отрезка трубы (патрубка) и фланца. Минимальная длина его должна быть достаточной для удобной установки болтов при сборке фланцевого соединения. Для случаев защиты аппаратов теплоизоляцией штуцера делают удлиненными. Штуцера малых размеров устанавливать на крупных аппаратах нежелательно из-за опасности поломки. Когда установка маленьких штуцеров все же необходима и они имеют значительную длину, их укрепляют продольными ребрами жесткости (рис. 43).

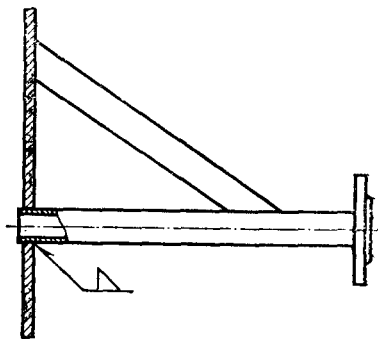


Рис. 43. Штуцер, укрепленный ребрами жесткости

Приваривают штуцер к аппарату по одному из вариантов, показанных на рис. 44. Наиболее распространен стандартный вариант *I*. Вариант *II* применяют в тех случаях, когда внутри аппарата не должно быть никаких выступающих частей. Приварка встык к отбортованному краю отверстия конструктивно совершеннее (вариант *III*). Этот способ сложен и применяется срав-

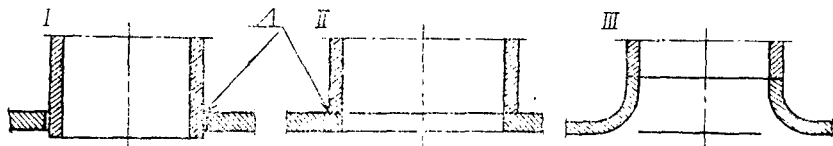


Рис. 44. Варианты приварки штуцеров

нительно редко, в основном на эмалированной и гуммированной аппаратуре. Штуцера литых аппаратов отливают заодно с корпусом.

Иногда в штуцере вставляют патрубки наполнения (рис. 45), чтобы предотвратить стекание жидкости по стенкам аппарата. Штуцера, работающие с застывающими жидкостями, снабжают рубашками для обогрева (рис. 46). Наиболее простой обогреваемый патрубок изготавливают по типу *I*. Если аппарат имеет обогревающую рубашку, то к ней присоединяют патрубок (тип *II*). При необходи-

мости осуществлять контроль сварного шва штуцера патрубков делают по типу *III*.

Штуцера, предназначенные для слива жидкости, должны располагаться в низшей точке и обеспечивать полное удаление жидкости. Когда штуцер направлен вбок, это вызывает некоторые трудности.

Приварка штуцера к днищу аппарата (рис. 47, *а*) требует поднятия аппарата. Приварка штуцера вровень с днищем аппарата (рис. 47, *б*) обеспечивает полный слив, но фланец штуцера опущен ниже днища аппарата, что заставляет приподнимать аппарат выше уровня пола. Устанавливают изогнутый штуцер (рис. 47, *в*) тогда, когда ниже опустить ось штуцера невозможно, однако в данном случае небольшое количество жидкости все же остается.

Бобышки. Представляют собой фланцы, приваренные непосредственно к корпусу аппарата или утолщения на литом корпусе. Трубопроводы к бобышкам присоединяют с помощью шпилек. Это существенный недостаток, так как при поломке шпилек удаление их пред-

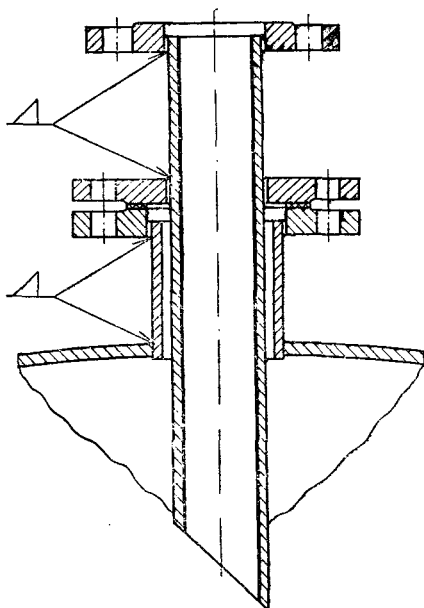


Рис. 45. Штуцер с патрубком наполнения

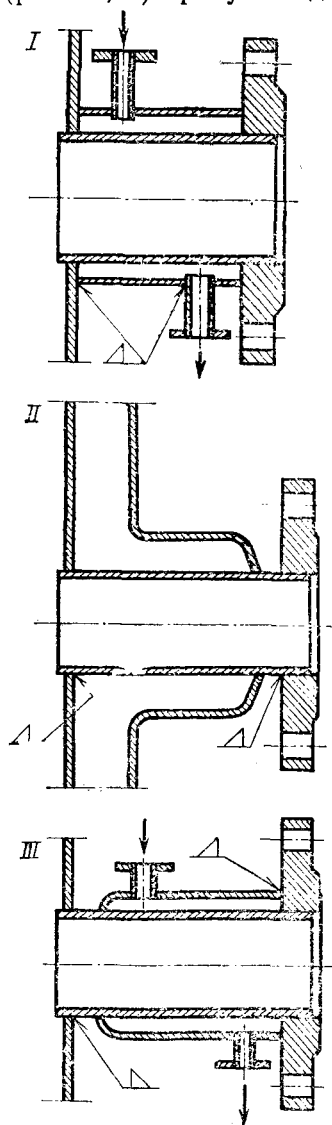


Рис. 46. Штуцера с обогревом

ставляет значительные трудности. Бобышки применяют при установке сальников, контрольно-измерительных приборов и в других случаях, когда устройство штуцеров по каким-либо причинам нежелательно или невозможно. Иногда на аппаратах из механически непрочных материалов штуцера заменяют бобышками. Бобышки из углеродистой стали изготавливают по типу, показанному на

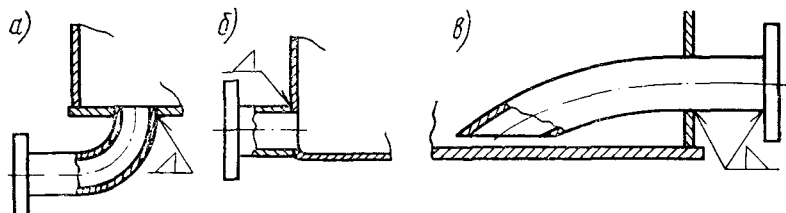


Рис. 47. Приварка сливных штуцеров

рис. 48, а. При больших диаметрах корпус бобышки делают из углеродистой стали, а защитные накладки — из кислотостойкой стали. На медных (рис. 48, б) и алюминиевых (рис. 48, в) аппаратах применяют стальные бобышки, защищенные цветным металлом.

Штуцера и бобышки аппарата при его отправке снабжают парными (ответными) фланцами, что облегчает присоединение трубопроводов при монтажных работах.

Смотровые окна. Их устанавливают, когда необходимо наблюдать за работой герметичных аппаратов. Более распространена установка окон на бобышках. Обычно на аппарате располагают два окна и на одном из них помещают светильник. Диаметр смотровых окон  $50 \div 150$  мм. Простейшая конструкция смотрового окна показана на

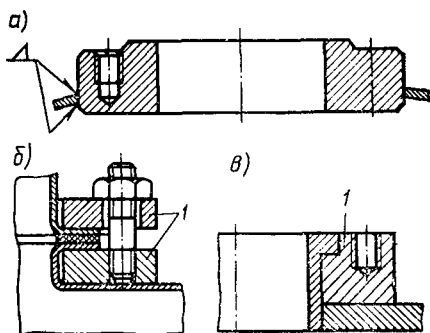


Рис. 48. Бобышки:

а — стальная приварная; б — на медном аппарате; в — на алюминиевом аппарате

рис. 49, а. Узел соединения стекла является весьма ответственным, так как требуется определенное усилие, затягивающее стекло, поэтому более предпочтительна конструкция, показанная на рис. 49, б. Здесь стекло с двумя фланцами представляет собой отдельный узел, который собирают с соблюдением определенных правил и затем уже ставят на аппарат.

Основная деталь смотрового окна — стекло. В типовых смотровых окнах применяют толстые иллюминаторные стекла, рассчитанные на давление до  $0,6 \text{ Н/мм}^2$  и температуру не более  $150^\circ \text{С}$ . При высокой температуре устройство смотровых окон для аппаратов затруднительно из-за сложности выбора термостойкого стекла. Если поверхность стекла во время работы сильно загрязняется,

устанавливают патрубки для промывки окон, в которые периодически подают воду или какую-либо другую промывную жидкость. Для наблюдения за уровнем жидкости устанавливают мерные стекла (рамки). Пространство рамки соединяется с аппаратом через два отверстия в стенке аппарата. Для удобства наблюдения за уровнем жидкости стекло делают рифленным.

**Люки.** Служат для осмотра аппарата, монтажа и демонтажа внутренних устройств, загрузки сырья и очистки. По действующим нормам изготавливают люки диаметром 150; 250; 400; 500; 600 и 800 мм. Конструкции люков и лазов зависят от условий работы и

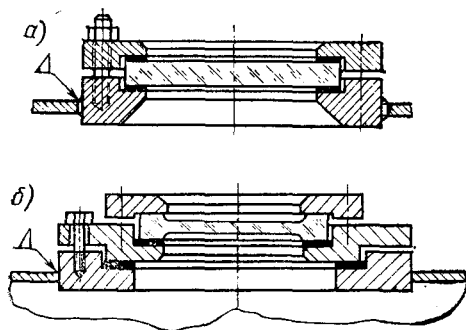


Рис. 49. Смотровые окна

давления в аппарате. Если лазом пользуются редко, то крышку его делают в виде заглушки (рис. 50, а). При необходимости частого открывания крышку делают на откидных болтах (рис. 50, б), которые отвертывают значительно быстрее, чем обыкновенные, а люки и лазы, которые необходимо открывать несколько раз в день, делают с поворотной скобой, на конец которой накидывают петлю. Уплотнение крышки осуществляют с помощью

нажимного винта, закрепленного в центре скобы (рис. 50, в). Люки со скобой очень удобны в работе при необходимости загрузки сыпучих продуктов в аппарат, однако они очень ненадежны, так как повреждение любого узла, нагруженного давлением, ведет к разрушению всего люка. Поэтому в настоящее время их снимают с производства.

Овальные люки (рис. 50, г) устанавливают там, где их редко открывают, например в котлах и ресиверах. Овальная форма позволяет занести крышку через отверстие внутрь аппарата. Давление прижимает крышку люка к гнезду и повышает его герметичность.

Если крышка люка весит не более 20 кг, то она откидывается на петлях. Для подъема более тяжелых крышек применяют специальную укосину. Люки могут устанавливаться на горизонтальной, вертикальной и наклонной плоскостях, однако наклонная установка люков с тяжелыми крышками нежелательна. При установке люков на вертикальной стенке необходимо обеспечивать подвеску крышки (рис. 54, д).

**Ослабление стенок сосудов и аппаратов отверстиями и его компенсация.** Отверстия существенно ослабляют стенки днищ и обечаек. Особенно нежелательны отверстия в наиболее напряженных и ответственных местах: в отбортованных краях днищ, вблизи установки опор и на сварных швах. Правилами Госгортехнадзора и ОСТ 26-291—71 не допускается расположение отверстий на краю эллиптического отбортованного днища. Рас-

стояние от края отверстия до края дна, измеряемое по проекции, должно быть не менее  $0,1D_{\text{вн}}$  — внутреннего диаметра дна (рис. 51). Нежелательно также устраивать отверстия на отбортованной части конического дна. По ОСТ 26-291—71 расстояние между

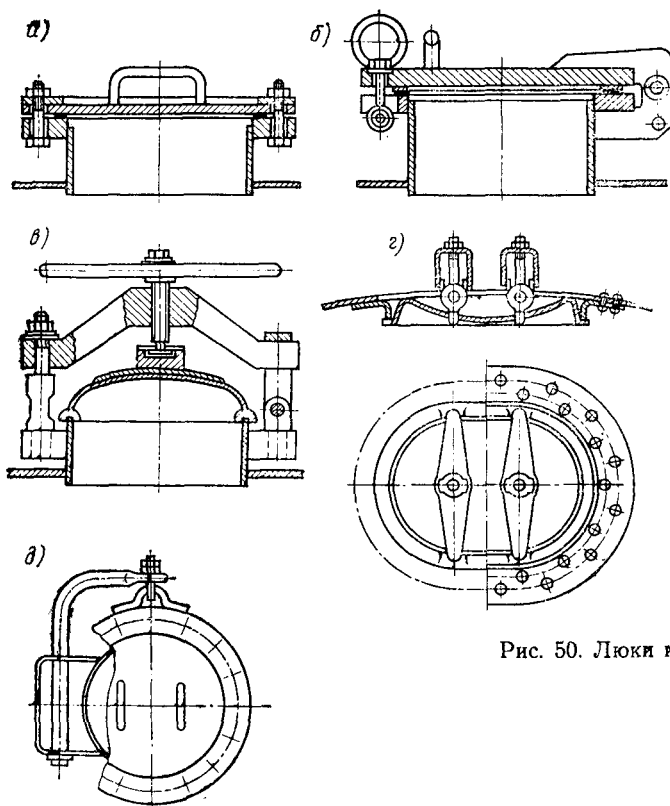


Рис. 50. Люки и лазы

центрами двух соседних отверстий должно быть  $\geq 0,7(d_1 + d_2)$ , где  $d_1$  и  $d_2$  — диаметры отверстий. Если размер отверстия в дне превосходит половину его диаметра, то рекомендуется делать вместо дна конический или отбортованный переход.

Расположение нескольких отверстий на одной образующей цилиндра ослабляет его и поэтому нежелательно. Местные напряжения на краю отверстия почти в пять раз пре-

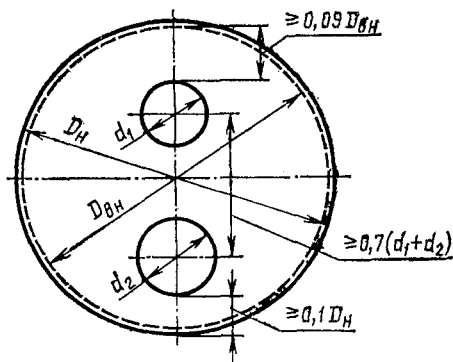


Рис. 51. Допускаемое расположение отверстий на крышке аппарата

вышают расчетные для цельного днища, но они быстро уменьшаются по мере удаления от края отверстия и на расстоянии половины диаметра становятся очень малыми. Поэтому элементы укрепления отверстия необходимо располагать в непосредственной близости от его края.

Возможны следующие способы компенсации ослабления стенки отверстием: 1) общее увеличение толщины стенки по сравнению с расчетной (на внутреннее давление); 2) увеличение толщины стенки штуцера по сравнению с расчетной; 3) приварка специальных укрепляющих элементов — втулок или колец (рис. 52). Увеличение толщины стенки приводит к значительному превышению веса аппарата и может быть рекомендовано только в тех случаях, когда

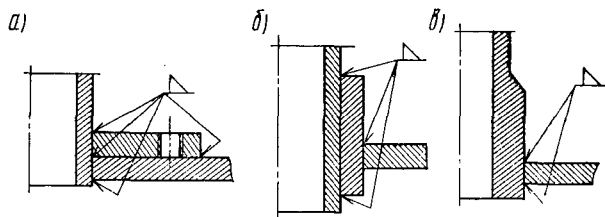


Рис. 52. Способы укрепления отверстий:  
а — плоское кольцо; б — втулка; в — штуцер с утолщением

необходимо укрепить одновременно несколько отверстий или приварка накладных колец или втулок по каким-либо причинам невозможна. Наиболее совершенным является способ укрепления с помощью утолщенных штуцеров. Эта конструкция сложна в изготовлении, поэтому наиболее распространенным способом пока остается приварка колец. Укрепляющие кольца должны быть тщательно подогнаны к поверхности аппарата. Каждое кольцо снабжается сигнальным отверстием с резьбой, которое во время работы остается открытым. Оно позволяет обнаружить нарушение герметичности во внутреннем сварном шве. При ремонте аппарата через сигнальное отверстие сжатым воздухом испытывают плотность сварных швов кольца. При расчете укрепления отверстия руководствуются следующими соображениями.

Рассмотрим цилиндрическую оболочку. Сечение оболочки по образующей, которое воспринимает кольцевые напряжения, равно  $Ls_p$  ( $L$  — длина оболочки;  $s_p$  — расчетная толщина). Если оболочка ослаблена отверстием диаметром  $d$ , площадь сечения уменьшается на величину  $ds_p$ , следовательно, площадь  $ds_p$  должна быть компенсирована за счет элементов, расположенных в зоне концентрации напряжений. Ниже изложен метод расчета, приведенный в ОСТ 26-771—73. Для сосудов, работающих под внутренним давлением при укреплении отверстия со штуцером накладным кольцом, должно быть выполнено условие

$$(l_{1p} + s_{2p} + s - s_p - c)(s_1 - s_{1p} - c) + l_{2p}(s_1 - 2c) + (s_{2p} + s - 0,875s_p - c) \sqrt{D_p(s_{2p} + s - c)} \geq (d/2 + c)s_p, \quad (42)$$

где  $l_{1p}$ ,  $l_{2p}$  — длина штуцеров (рис. 53);  $s_{2p}$  — расчетная толщина накладного листа;  $s$  — толщина стенки сосуда;  $s_p$  — расчетная толщина стенки сосуда;  $c$  — прибавка на коррозию;  $s_1$  — толщина стенки штуцера;  $s_{1p}$  — расчетная толщина стенки штуцера;  $D_p$  — расчетный внутренний диаметр сосуда;  $d$  — внутренний диаметр штуцера.

Значения  $s_p$  и  $s_{1p}$  определяют по (10) или (18), но без прибавки на коррозию  $c$ . Величину  $s_{2p}$  при условии, что  $L \geq \sqrt{D(s_2 + s - c)}$

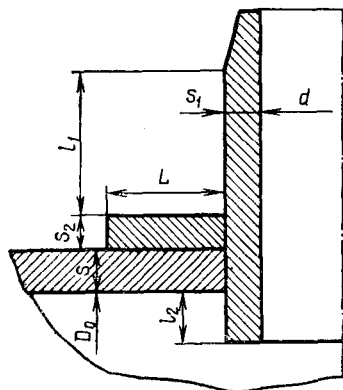


Рис. 53. К расчету укрепления отверстия

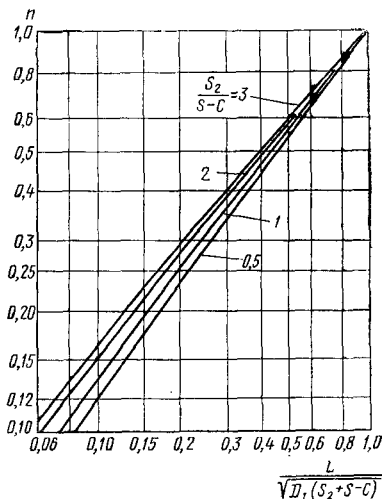


Рис. 54. График для определения коэффициента  $n$

(см. рис. 50), принимают равной фактической толщине кольца  $s_2$ , а при  $L < \sqrt{D_p(s_2 + s - c)}$  вводят понижающий коэффициент  $n$ , определяемый по графику, данному на рис. 54, т. е.  $s_{2p} = ns_2$ . Участвующая в укреплении расчетная высота штуцера  $l_{1p} \leq 1,25 \sqrt{(d + 2c)(s_1 - c)}$ , а при расчете  $l_{2p} \leq 0,5 \sqrt{(d + 2c)(s_1 - 2c)}$ . Для цилиндрических оболочек и полушаровых днищ расчетный диаметр сосуда равен его внутреннему диаметру, для эллиптических днищ  $D_p = 0,5D$  и для конических днищ  $D_p = D/\cos \alpha$ . При отсутствии накладного кольца, когда укрепление осуществляют только за счет стенки штуцера, значение  $s_{2p}$  [см. (42)] соответственно обращается в ноль; значение  $l_1$  в этом случае отсчитывается от наружной поверхности сосуда.

Наибольший диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления  $d_0 = 2 \left\{ \left[ \frac{(s - c)}{s_p} - 0,875 \right] \sqrt{D_p(s - c)} - c \right\}$ . Весьма эффективным способом компенсации ослабления отверстия является отбортовка стенки сосуда или аппарата. Условие укрепления отверстия

с отбортованным краем составляет

$$2(l_{3p} + s - s_p - c)(s_3 - s_{1p} - c) \geq (d_9 - d_0)s_p,$$

где  $l_{3p} \leq \sqrt{(d + 2c)(s_3 - c)}$  — расчетная длина штуцера;  $s_3$  — толщина стенки штуцера;  $s_{1p}$  — расчетная толщина стенки штуцера;  $d_9$  — эквивалентный диаметр отверстия, который определяется приближенно, как это показано на рис. 55.

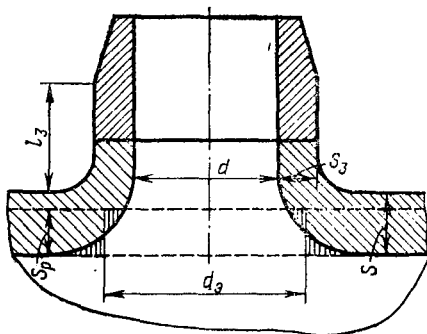


Рис. 55. К расчету отверстия с отбортованным краем

## § 2.7. Опоры аппаратов и устройства для строповки

**Опоры.** Служат для установки аппаратов на фундаменты и несущие конструкции. Тип опоры выбирают в зависимости от конструкции оборудования, нагрузки и способа установки. Широко применяют лапы опорные (рис. 56, а) при установке вертикальных аппаратов на полу или на фундаментах и боковые (рис. 56, б) — при подвеске их между перекрытиями. Лапы имеют отверстия для крепления оборудования к фундаменту и отжимные болты, которые служат для точной установки машин и аппаратов при монтаже. Реже, чем лапы, применяют опоры из труб и уголков (рис. 56, в).

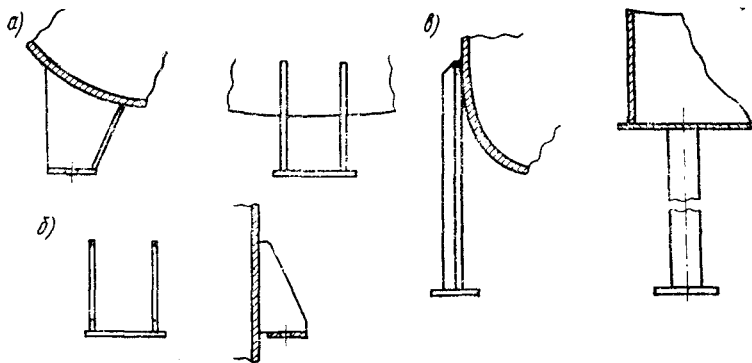


Рис. 56. Опоры аппаратов

При наличии нижних опор аппарат устанавливается на три или четыре точки, при подвеске между перекрытиями делают обычно четыре лапы, хотя возможна установка легких аппаратов и на две. Тяжелые аппараты, у которых нагрузка сосредоточена на сравнительно малой площади, опираются на массивные кольцевые опоры.

У стальных сварных аппаратов лапы приваривают к корпусу, у литых отливают заодно с корпусом. На аппаратах из механически непрочных материалов вместо лап делают небольшие выступы, которые опираются на стальную кольцевую опору (рис. 57). При расчете опор необходимо учитывать устройство строительных или монтажных конструкций, на которые устанавливается аппарат, а также особенности работы последнего. Например, лапы аппаратов, имеющих большую толщину слоя термоизоляции, необходимо выполнять удлиненными, чтобы они выступали из изоляции. Если этого не делать, в слое изоляции придется устраивать выемки, что очень нежелательно.

Расчет лап сводится к определению площади опорной подошвы или удельного давления лапы на опорную конструкцию, а также к расчету на прочность элементов лапы и проверке прочности стенки аппарата в месте ее установки.

Основная исходная величина для расчета — нагрузка на лапу

$$Q = G_{\max}/n, \quad (43)$$

где  $G_{\max}$  — максимальный вес аппарата, включающий в себя вес самого аппарата, футеровки, термоизоляции, трубопроводов и различных конструкций, опирающихся на аппарат, а также максимально возможный вес продуктов, заполняющих его, или вес воды при гидравлическом испытании;  $n$  — число лап.

Площадь подошвы лапы определяют исходя из максимально допустимого удельного давления на опорную конструкцию:

$$F = Q/q_{\text{уд}}, \quad (44)$$

где  $q_{\text{уд}}$  — удельное давление. Для кирпичной кладки  $q_{\text{уд}} = 1,6 \text{ Н/мм}^2$ , для бетонного фундамента  $q_{\text{уд}} = 2 \div 4 \text{ Н/мм}^2$ .

При определении площади  $F$  опоры или фактической величины удельного давления необходимо учитывать реальную площадь подошвы, которая опирается на несущие конструкции.

Ответственный элемент лапы — вертикальные ребра. Их рассчитывают на сжатие и на устойчивость [2]. Напряжения в ребре

$$\sigma = 2,24Q/(kmsa), \quad (45)$$

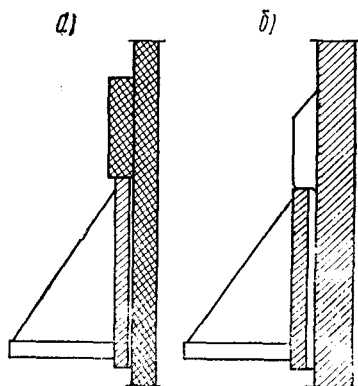


Рис. 57. Кольцевые опоры для аппаратов из механически непрочных материалов:

*a* — для аппаратов из пластмасс и цветных металлов; *б* — для литых аппаратов

где  $k$  — коэффициент, определяемый по графику, приведенному на рис. 58, в зависимости от гибкости ребра  $\lambda = l / (0,289s)$  ( $l$  — гипотенуза ребра);  $m$  — число ребер в опоре;  $s$  — толщина ребра, мм;  $a$  — вылет ребра, мм.

Для стали марки СтЗ напряжение в ребрах должно быть не более  $100 \text{ Н/мм}^2$ . Если оно больше допустимого, то увеличивают толщину ребра и рассчитывают повторно. Боковые сварные швы проверяют на срез:  $\tau = Q / (0,7\Delta L)$ , где  $\Delta = 0,85s$  — катет шва, мм;  $L$  — общая длина шва, мм.

Напряжение в сварном шве  $\leq 80 \text{ Н/мм}^2$ .

Производить расчет нормализованных опор нет необходимости. В данном случае задача сводится к выбору типа опоры по заданной нагрузке.

Рис. 58. График  $k$  расчету ребра опоры

**Опоры горизонтальных аппаратов.** Большое количество аппаратов, например, емкости, теплообменники и др., устанавливают на опорах горизонтально. В принципе возможна (сравнительно редко) установка небольших горизонтальных аппаратов на лапы, аналогичные по конструкции тем, которые применяют для вертикальных. Чаще используют седловидные опоры, охватывающие аппарат не менее чем на  $120^\circ$  по окружности.

Если аппараты устанавливают друг на друга (например, секционные теплообменники), то в качестве опор могут служить штуцера аппаратов.

**Устройства для строповки аппаратов.** Поднимают и перемещают аппараты при монтаже и ремонте с помощью строповки их канатами или цепями. Для удобства строповки вертикальных аппаратов на них предусматривают специальные устройства — ушки (рис. 59, б), крюки (рис. 59, а). Предпочтительна установка цапф (рис. 59, в), так как с помощью двух цапф, приваренных к боковой поверхности, сравнительно легко повернуть аппарат при монтаже из горизонтального положения в вертикальное. Установку грузозахватных приспособлений рекомендуют делать возможно выше, но обязательно выше центра тяжести (ЦТ) не менее чем на  $200 \div 300 \text{ мм}$ . Горизонтальные аппараты обычно поднимают, обхватывая их стропами (рис. 60), поэтому грузозахватные устройства для них, как правило, не требуются. Для подъема крышек аппаратов предусмат-

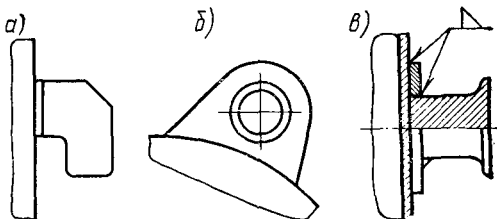


Рис. 59. Грузозахватные приспособления

ривают три ушка. Для стальных аппаратов ушки, крюки и цапфы приваривают к корпусу аппарата, на литых аппаратах их отливают заодно с корпусом, на толстостенных аппаратах высокого давления делают съемные цапфы (рис. 61).

Установка грузозахватных устройств на аппаратах из механически непрочных материалов представляет некоторые трудности. Иногда аппарат приходится охватывать стальным бандажом, к которому крепится цапфа.

Если аппарат имеет достаточно прочные штуцера, люки или другие выступающие элементы, то они могут быть использованы для монтажа при условии обязательной проверки их на прочность.

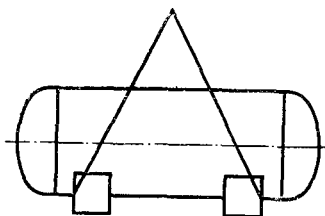


Рис. 60. Способ подъема горизонтального аппарата без специальных грузозахватных устройств

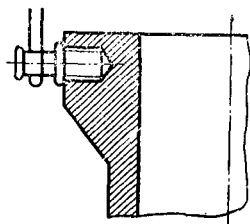


Рис. 61. Съемная цапфа колонны высокого давления

Грузозахватные устройства нормализованы и выбираются по ГОСТам в зависимости от заданной нагрузки.

Нестандартные грузозахватные приспособления необходимо рассчитывать на прочность. Приходящаяся на них нагрузка

$$P = K_n K_d K_y Q_{мн} / z, \quad (46)$$

где  $K_n = 1,1$  — коэффициент перегрузки;  $K_d = 1,1$  — коэффициент динамичности;  $K_y$  — коэффициент условий работы, учитывающий неравномерную нагрузку на все точки загрузки (при подъеме с помощью траверсы  $K_y = 1,0$ , при подъеме без траверсы  $K_y = 1,2$ );  $Q_{мн}$  — вес аппарата в состоянии монтажа;  $z$  — число грузозахватных устройств.

В месте установки лап или грузозахватных приспособлений в стенке аппарата возникают значительные изгибающие напряжения, поэтому необходимо рассчитывать стенку на прочность. В случае необходимости стенку укрепляют подкладными листами, толщина которых берут обычно равной толщине стенки аппарата.

**Пример 1.** Произвести расчет стального аппарата с рубашкой, имеющего эллиптические днище и крышку. Внутренний диаметр аппарата  $D = 1800$  мм; диаметр рубашки  $D_p = 1900$  мм; расчетная длина рубашки  $L = 2400$  мм; давление в аппарате  $p = 0,6$  Н/мм<sup>2</sup>; давление в рубашке  $p_p = 0,3$  Н/мм<sup>2</sup>; температура в аппарате и в рубашке  $t_p = 150^\circ\text{C}$ . Материал корпуса аппарата и рубашки — сталь ВСт3сп3.

Нормативное допускаемое напряжение для стали Ст3 при температуре  $150^\circ\text{C}$  по табл. 6 принимаем  $[\sigma] = 131$  Н/мм<sup>2</sup>.  $E = 1,9 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup> — модуль упруго-

сти для углеродистой стали при  $t=120^\circ\text{C}$ . Коэффициент условий работы  $\eta=1$ , следовательно, расчетное допускаемое напряжение равно нормативному. Сварка автоматическая двусторонняя, коэффициент прочности сварного шва  $\varphi=0,95$ . Среда некоррозионная, прибавку на коррозию принимаем  $c=1$  мм; дополнительную прибавку  $c_1=0,8$  мм.

**Решение.** Рассчитаем таблицу обечайки корпуса на внутреннее давление:

$$s = pD/(2[\sigma]\varphi - p) + c + c_1 = 0,6 \cdot 1800/(2 \cdot 131 \cdot 0,95 - 0,6) + 1,0 + 0,8 = 6,16 \text{ мм};$$

на наружное давление (рассматриваем обечайку как короткую цилиндрическую оболочку):

$$s = 0,47 \frac{D}{100} \left( \frac{p}{10^{-6}E} \frac{L}{D} \right)^{0,4} + c + c_1 = 0,47 \frac{1800}{100} \left( \frac{0,3}{10^{-6} \cdot 1,9 \cdot 10^5} \cdot \frac{2400}{1800} \right)^{0,4} + 1 + 0,8 = 13,2 \text{ мм}.$$

Принимаем наибольшее значение толщины  $s=13,2$  мм. Округляя в сторону увеличения до ближайшей стандартной толщины листа, получаем  $s=14$  мм.

Рассчитаем толщину днища и крышки корпуса на внутреннее давление:

$$s = pR/(2[\sigma]\varphi - p) + c + c_1 = 0,6 \cdot 1800/(2 \cdot 131 \cdot 0,95 - 0,6) + 1 + 0,8 = 6,15 \text{ мм},$$

где  $R=1800$  мм — радиус кривизны эллиптического днища. На наружное давление предварительно принимаем  $R/(s-c)=150$ ; для стандартного эллиптического днища  $H/D=0,25$ . Для указанных соотношений по графику, приведенному на рис. 25, определяем коэффициент  $k_a=0,94$ . Тогда толщина стенки

$$s_1 = \frac{k_a R}{300} \sqrt{\frac{p}{10^{-6}E}} + c + c_1 = \frac{0,94 \cdot 180}{300} \sqrt{\frac{0,3}{10^{-6} \cdot 1,9 \cdot 10^5}} + 1 + 0,8 = 8,9 \text{ мм};$$

$$s_2 = pR\beta_1/(2[\sigma]) + c + c_1 = 0,3 \cdot 1800/(2 \cdot 131) + 1 + 0,8 = 9,25 \text{ мм},$$

$$\text{где } \beta_1 = 0,5 + \sqrt{0,25 + 12k_a^2[\sigma_\tau/(\sigma E p)]} =$$

$$= 0,5 + \sqrt{0,25 + 12 \cdot 0,94^2 \cdot (131/0,3) \cdot 200/(1,9 \cdot 10^5)} = 2,76.$$

Принимаем толщину днища  $s=10$  мм.

Рассчитываем толщину рубашки обечайки:

$$s = pD_p/(2[\sigma]\varphi - p) + c + c_1 = 0,3 \cdot 1900/(2 \cdot 131 \cdot 0,95 - 0,3) + 0,8 = 4,1 \text{ мм}$$

и днища:

$$s = pR/(2[\sigma]\varphi - p) + c + c_1 = 0,3 \cdot 1900/(2 \cdot 131 \cdot 0,95 - 0,3) + 0,8 = 4,1 \text{ мм}.$$

Принимаем толщину обечайки и днища  $s=5$  мм.

**Пример 2.** Колонна диаметром 1600 мм и высотой 16 м работает под вакуумом. Температура в колонне  $20^\circ\text{C}$ , материал — Ст3. Рассчитать колонну для двух случаев: 1) колонна без колец жесткости; 2) колонна укреплена кольцами жесткости с расстоянием между ними 1600 мм. Весовыми нагрузками пренебречь. Прибавка на коррозию  $c=2$  мм.

**Решение.** Первый случай. Отношение  $L/D=16000/1600=10$ .

Колонну рассчитываем как длинную цилиндрическую оболочку, нагруженную наружным давлением  $0,1$  Н/мм<sup>2</sup>:

$$s = 1,06 \frac{D}{100} \sqrt[3]{\frac{p}{10^{-6}E}} + c = 1,06 \frac{1600}{100} \sqrt[3]{\frac{0,1}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5}} + 2 = 15,5 \text{ мм}.$$

Принимаем  $s=16$  мм.

Масса обечайки  $\approx 10$  т.

Второй случай. Колонна укреплена кольцами жесткости. Участок между кольцами жесткости рассчитываем как короткую цилиндрическую оболочку:

$$s = 0,47 \frac{D}{100} \left( \frac{p}{10^{-6} E} \frac{L}{D} \right)^{0,4} + c = 0,47 \frac{1600}{100} \left( \frac{0,1}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5} \cdot \frac{1600}{1600} \right)^{0,4} + 2 = 7,7 \text{ мм.}$$

Принимаем  $s=8$  мм.

Для расчета колец жесткости вычисляем необходимый момент инерции кольца

$$J_{\text{тр}} = (L/12) [1,18 p D^3 / E - (s - c)^3] = (1600/12) [1,18 \cdot 0,1 \cdot 1600^3 / (2 \cdot 10^5) - (8 - 2)^3] = 2,94 \cdot 10^5 \text{ мм}^4 = 29,4 \text{ см}^2.$$

Устанавливаем кольцо прямоугольного сечения толщиной  $a=10$  мм и высотой  $h=60$  мм (рис. 62). Определяем эффективный момент инерции составного сечения, включающего в себя кольцо жесткости и участок обечайки:

$$J_{xx} = J_0 + F(l + l_0)^2 + [I_{\text{эф}}(s - c)^2 / 10,92] \times \\ \times [1 + 12 [l_0 / (s - c)]^2],$$

где  $J_0 = b h^3 / 12 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ мм}^4$  — момент инерции кольца жесткости относительно собственной оси симметрии;  $F=600 \text{ мм}^2$  — площадь поперечного сечения кольца жесткости;  $l=3,3$  мм — расстояние от оси, лежащей на срединной поверхности стенки обечайки, до ЦТ сечения кольца жесткости:

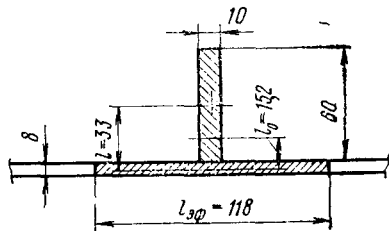


Рис. 62. К расчету кольца жесткости

$$l_{\text{эф}} = a + 1,1 \sqrt{D(s - c)} = 1,0 + 1,1 \sqrt{1600(8 - 2)} = 118 \text{ мм}$$

— эффективная длина стенки аппарата;

$l_0=15,2$  мм — расстояние от оси срединной поверхности до ЦТ составного сечения. Тогда

$$J_{xx} = 1,8 \cdot 10^5 + 6(3,3 - 15,2)^2 + [1,18(8 - 2)^3 / 10,92] \cdot \{1 + 12 [1,52 / (8 - 2)]^2\} = 4,82 \cdot 10^5 \text{ мм}^4.$$

Таким образом,  $J_{xx} > J$ , а поэтому кольцо сечением  $10 \times 60$  мм обеспечивает укрепление стенки обечайки.

Масса обечайки с кольцами жесткости равна примерно 5,3 т, т. е. почти вдвое меньше, чем без колец.

**Пример 3.** Произвести расчет отбортованного конического днища (угол при основании днища  $90^\circ$ ) аппарата из кислотостойкой стали 08X18H10T. Диаметр аппарата 2600 мм, давление 1,6 Н/мм<sup>2</sup>, температура  $400^\circ\text{C}$ . Расчетную температуру принимаем  $400 + 50 = 450^\circ\text{C}$ , так как аппарат обогревается открытыми электронагревателями и служит для работы с взрывоопасными продуктами). Нормативное допускаемое напряжение  $\sigma^* = 84 \text{ Н/мм}^2$  находим по табл. 6.

Находим расчетное допускаемое напряжение  $[\sigma] = \sigma^* \eta = 84 \cdot 0,9 = 75,5 \text{ Н/мм}^2$ .

Среда взрывоопасная, коэффициент условной работы  $\eta = 0,9$ . Принимаем коэффициент прочности сварного шва  $\varphi = 1$  (двусторонняя автоматическая сварка), суммарную прибавку  $c + c_1 = 1,5$  мм.

Диаметр линии перехода  $D_p = 2400$  мм, радиус отбортовки днища  $r = 390$  мм.

**Решение.** Толщина конической части днища

$$s = \frac{pD_p}{\cos \alpha (2 [\sigma] \varphi - p)} + c + c_1 = \frac{1,6 \cdot 2400}{0,707 (2 \cdot 75,5 \cdot 1 - 1,6)} + 1,5 = 37,8 \text{ мм};$$

отбортованной части днища

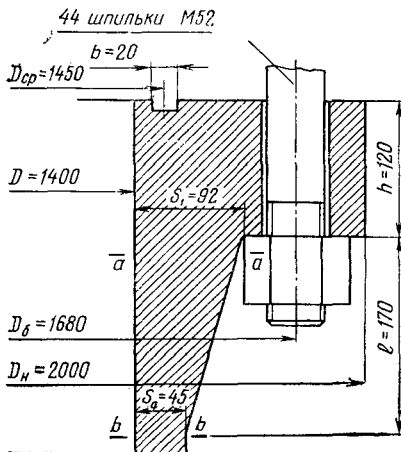


Рис. 63. К расчету фланцевого соединения

$$s = pDy_K(4[\sigma]\varphi) + c + c_1 = 1,6 \cdot 2600 \times \\ \times 1,8 / (4 \cdot 75 \cdot 5 \cdot 1) + 1,5 = 26,3 \text{ мм},$$

где  $y_k$  определяется по графику, изображенному на рис. 22. Принимаем толщину днища  $s=38$  мм.

**Пример 4.** Рассчитать фланцевое соединение стального сварного автоклава со следующими параметрами: диаметр внутренний  $D=1400$  мм; давление расчетное  $p=5$  Н/мм<sup>2</sup>; температура расчетная  $t_p=200^\circ\text{C}$ . Материал: корпуса (и соответственно фланцев) — сталь 09Г2С; шпилек — сталь 35Х, среда в аппарате — нетоксичная, невзрывоопасная, следовательно, коэффициент условий работы  $\eta=1$ . Толщина стенки аппарата 45 мм.

В соответствии с рекомендацией  
ОСТ 26-373—71 принимаем размеры  
фланцевого соединения, показанные на  
рис. 63.

Решение. Принимаем расчетную ширину прокладки  $b_0 = 1,9 \sqrt{b} = 1,9 \times \sqrt{20} = 8,5$  мм. Материал прокладки — асбест в металлической оболочке, имеющий коэффициент  $m = 3,5$ .

Равнодействующая внутреннего давления

$$Q_{\pi} = 0,785 D_{\text{ср}}^2 p = 0,785 \cdot 14502 \cdot 5,0 = 8,2 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

В рабочих условиях реакция прокладки

$$R_{II} = 2\pi b_0 m p = 2 \cdot 3,14 \cdot 1450 \cdot 8,5 \cdot 3,5 \cdot 5,0 = 1,35 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Усилие, возникающее от разности температур фланца и шпилек,

$$Q_t = \gamma n f_6 E_6 t_{\Phi} (\alpha_{\Phi} - \alpha_6 k_1) = 0,3 \cdot 44 \cdot 1720 \cdot 2,0 \cdot 10^5 \cdot 200 (12 \cdot 10^{-6} - 12 \cdot 10^{-6} \cdot 0,97) = 0,30 \cdot 10^6 \text{ H},$$

где  $\gamma=0,3$ ;  $n=44$  — число шпилек;  $f_6=1720 \text{ мм}^2$  — сечение шпилек по внутреннему диаметру резьбы;  $E_6=2,0 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$  — модуль упругости материала шпильки;  $\alpha_\Phi=\alpha_6=12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  — коэффициенты температурного расширения материала фланцев и шпилек;  $t_\Phi=200^\circ\text{C}$ ;  $t_6=0,97 \cdot 200=194^\circ\text{C}$  — температура фланца и шпильки соответственно;  $k_1=0,97$  определяют по табл. 13.

Болтовая нагрузка в условиях монтажа

$$P_{61} = \xi (\alpha Q_{II} + R_{II}) = 1,26 (1,25 \cdot 8,2 \cdot 10^6 + 1,35 \cdot 10^6) = 14,5 \cdot 10^6 \text{ H},$$

где  $\xi = [\sigma]_{20^\circ \text{C}} / [\sigma]_{200^\circ \text{C}} = 280/222 = 1,26$ ;  $[\sigma]_{20^\circ \text{C}} = \sigma_{\tau, 20^\circ \text{C}} = 280 \text{ Н/мм}^2$ ;

$$[\sigma]_{200^\circ \text{ C}} = \sigma_{\tau 200^\circ \text{ C}} = 222 \text{ H/MM}^2;$$

$\alpha = 1,25$  — коэффициент, определяемый по табл. 15; в рабочих условиях

$$P_{62} = Q_d + R_n + Q_t = 8,2 \cdot 10^6 + 1,35 \cdot 10^6 + 0,3 \cdot 10^6 = 9,85 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Допускаемые напряжения для шпилек

$$[\sigma]_{20^\circ \text{C}} = 230 \text{ Н/мм}^2; [\sigma]_{200^\circ \text{C}} = 225 \text{ Н/мм}^2.$$

Проверяем условия прочности шпилек:

$$P_{61}/(n f_6) = 14,5 \cdot 10^6 / (44 \cdot 1720) = 191 < 230 \text{ Н/мм}^2;$$

$$P_{62}/(n f_6) = 9,85 \cdot 10^6 / (44 \cdot 1720) = 130 < 225 \text{ Н/мм}^2.$$

Они удовлетворяются.

Приведенный изгибающий момент

$$M_{01} = P_{61} (D_6 - D_{с.п})/2 = 14,5 \cdot 10^6 (1680 - 1450)/2 = 1,67 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

$$\begin{aligned} M_{02} &= 0,5 [P_{62} (D_6 - D_{с.п}) + Q_d (D_{с.п} - D - s_0)] \cdot [\sigma]_{20^\circ \text{C}} / [\sigma]_{200^\circ \text{C}} = \\ &= 0,5 \cdot [9,85 \cdot 10^6 (1680 - 1450) + 8,2 \cdot 10^6 (1450 - 1400 - 67,5) \cdot 280/222 = \\ &= 1,33 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{мм}, \end{aligned}$$

где  $s_0 = \chi$ ;  $s_0 = 1,5 \cdot 45 = 67,5$ ;  $\chi$  определяется по графику, изображенному на рис. 37, при  $s_0/D = 45/1400 = 0,032$ ;  $\beta = s_1/s_0 = 92/45 = 2,04$ ;  $i = (s_1 - s_0)/l = (92 - 45)/170 = 0,276$ .

Из двух значений изгибающих моментов принимают наибольшее.  $M_0 = 1,67 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ . Принимаем наибольшее значение  $M_0 = 1,67 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ .

Толщину тарелки фланца принимаем равной 120 мм.

В сечении  $a-a$  (рис. 63) максимальное напряжение во втулке фланца:

$$\sigma_1 = 1,9 M_0 \omega / D (s_1 - c)^2 = 1,9 \cdot 1,67 \cdot 10^9 \cdot 0,186 / [1400 (92 - 2)^2] = 181 \text{ Н/мм}^2,$$

где

$$\omega = 1/[1 + 0,9\lambda (1 + \psi_1 j^2)] = 1/[1 + 0,9 \cdot 0,39 (1 + 0,17 \cdot 1,77^2)] = 0,65;$$

$$\lambda = h/\sqrt{D s_0} = 120/\sqrt{1400 \cdot 67,5} = 0,39;$$

$$j = h/s_0 = 120/67,5 = 1,77;$$

$\psi_1 = 0,17$  (при отношении  $k = D_n/D = 2000/1400 = 1,43$ ;  $\psi_1$  по графику, данному на рис. 39).

В сечении  $b-b$  напряжения во втулке

$$\sigma_0 = f \sigma_1 = 1,0 \cdot 181 = 181 \text{ Н/мм}^2,$$

где  $f = 1$  — коэффициент, определяют по графику, показанному на рис. 40, в зависимости от отношения

$$l/\sqrt{D s_0} = 170/\sqrt{1400 \cdot 45} = 0,677 \text{ и } \beta = 2,04.$$

В кольце фланца окружное напряжение

$$\begin{aligned} \sigma_k &= M_0 [1 - \omega (1 + 0,9\lambda)] \psi_2 / (D h^2) = 1,67 \cdot 10^9 [1 - 0,65 (1 + 0,9 \cdot 0,39)] \times \\ &\times 5,5 / (1400 \cdot 120^2) = 55,5 \text{ Н/мм}^2, \end{aligned}$$

где  $\psi_2 = 5,5$  определяют по графику, представленному на рис. 41.

Меридиональные напряжения в корпусе аппарата

$$\sigma_m = p D / [4 (s_0 - c)] = 5 \cdot 1400 / [4 (45 - 2)] = 41 \text{ Н/мм}^2.$$

Кольцевые напряжения в корпусе аппарата

$$\sigma_k = pD/[2(s - c)] = 5 \cdot 1400/[2(45 - 2)] = 82 \text{ Н/мм}^2.$$

Допускаемые напряжения для фланца в сечении  $a-a$   $[\sigma]_1 = \sigma_{T20^\circ\text{C}} \eta = 280 \times 1,0 = 280 \text{ Н/мм}^2$ ; в сечении  $b-b$   $[\sigma]_0 = 0,002 E_{20^\circ\text{C}} \eta = 0,002 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1,0 = 400 \text{ Н/мм}^2$ .

Проверяем условия прочности в сечении  $a-a$

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_k^2 + \sigma_1 \sigma_k} = \sqrt{181^2 + 55,5^2 + 181 \cdot 55,5} = 214 < 280 \text{ Н/мм}^2;$$

в сечении  $b-b$ :

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2 + (\sigma_0 + \sigma_m) \sigma_t} = \sqrt{(181 + 41)^2 + 82^2 + (181 + 41) 82} = 272 < 400 \text{ Н/мм}^2.$$

Условия прочности удовлетворяются.

## ГЛАВА 3

### ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ И УСТРОЙСТВА

#### § 3.1. Основные принципы конструирования теплообменных аппаратов

Теплообменное оборудование занимает значительный удельный вес в химической технологии. Наряду с теплообменниками, представляющими собой самостоятельные аппараты, применяют теплообменные элементы, являющиеся составными частями различных аппаратов. Теплообменники работают с самыми различными средами: коррозионными, токсичными и высоковязкими продуктами. Их эксплуатируют при температурах до  $1000^\circ\text{C}$  и давлениях до  $200 \text{ Н/мм}^2$ .

Свойства среды и ее параметры предъявляют свои требования к конструкции теплообменных аппаратов. Необходимо учитывать технологическое назначение теплообменников: различают аппараты для процесса теплообмена без изменения агрегатного состояния продуктов, конденсаторы, испарители и реакционные аппараты, сопровождающиеся интенсивным теплообменом.

Характер процессов, протекающих в теплообменнике, определяет в значительной степени его конструкцию; например, в испарителях необходимо обеспечить хороший отвод образующихся паров; если теплообмен сопровождается конденсацией паров, то следует предусматривать хороший отвод конденсата от теплообменных поверхностей.

При выборе конструкции и решении вопроса, в какую полость направлять тот или иной теплоагент, руководствуются следующими общими соображениями: 1) при высоком давлении теплоносителей применяют трубчатые теплообменники и теплоноситель с более высоким давлением направляют по трубам, так как они имеют малый диаметр и могут выдержать большое давление; 2) корродирующий

теплоноситель в трубчатых теплообменниках также целесообразно направлять по трубам; 3) загрязненные или дающие отложения теплоагенты необходимо направлять с той стороны поверхности теплообмена, где возможно производить очистку (в кожухотрубных теплообменниках более доступное для очистки трубное пространство, в змеевиковых теплообменниках — наружная сторона труб); 4) так как коэффициент теплоотдачи возрастает с увеличением скорости, для повышения эффективности теплообменников стремятся по возможности уменьшить сечение каналов для движения теплоагентов.

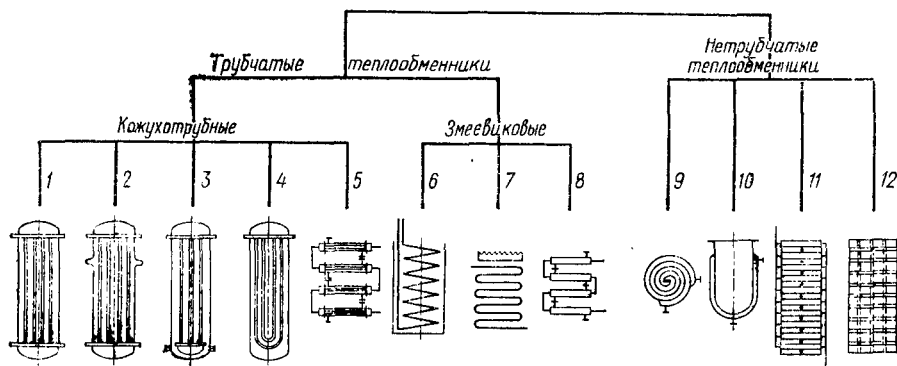


Рис. 64. Классификация поверхностных теплообменников:

1 — жесткие теплообменники; 2 — теплообменники с линзовым компенсатором; 3 — теплообменники с плавающей головкой; 4 — U-образные теплообменники; 5 — секционные кожухотрубчатые теплообменники; 6 — погружные змеевиковые теплообменники; 7 — оросительные теплообменники; 8 — теплообменники «труба в трубе»; 9 — спиральные теплообменники; 10 — теплообменная рубашка; 11 — пластинчатые теплообменники; 12 — блочные теплообменники

В теплообменниках необходимо по возможности обеспечить противоточное движение теплоносителей. Желательно, чтобы направление движения совпадало с направлением естественной циркуляции. При изменении агрегатного состояния одного из теплоносителей взаимное направление движения не имеет существенного значения.

На рис. 64 показаны основные типы теплообменников. Как видно из представленной схемы, теплообменные аппараты по форме поверхности подразделяются в основном на трубчатые и нетрубчатые. Теплообменники с поверхностью, образованной из труб, — наиболее старые и распространенные в настоящее время типы теплообменных аппаратов. Они просты в изготовлении, имеют большую надежность по сравнению с другими типами теплообменников при работе с токсичными продуктами, однако уступают некоторым современным нетрубчатым теплообменным аппаратам по таким важным технико-экономическим параметрам, как масса, приходящаяся на единицу поверхности теплообмена, и компактность, т. е. теплообменная поверхность, заключенная в единице объема аппарата, поэтому в настоящее время в промышленность широко внедря-

ются различные типы эффективных теплообменников: пластинчатых, спиральных, с оребренными поверхностями и др. Для изготовления теплообменных аппаратов используют практически все теплопроводные материалы, применяемые в химическом машиностроении. Широко применяют стальные теплообменники, теплообменные аппараты из меди, латуни, алюминия и титана, реже используют змеевики из свинца. Из неметаллических материалов широко применяют графит и реже — стекло и некоторые виды пластмасс. При работе с коррозионными средами применяют также эмалированные теплообменники. Теплообменники как аппараты массового применения в значительной степени нормализованы, поэтому задача обычно сводится к выбору стандартного аппарата по заданным параметрам.

### § 3.2. Кожухотрубные теплообменники

**Типы кожухотрубных теплообменников.** Кожухотрубные теплообменники в настоящее время широко распространены и составляют до 80% от всей теплообменной аппаратуры. Основная их часть — пучок труб, закрепленный в трубных решетках. Достоинство кожухотрубных теплообменников — возможность получения значительной поверхности теплообмена при сравнительно небольших табаритах и хорошо освоенная технология изготовления, недостаток — высокий расход металла по сравнению со спиральными и пластинчатыми теплообменниками.

Кожухотрубные теплообменники применяют при давлении до  $6,4 \text{ Н/мм}^2$  (чаще — до  $2,5 \text{ Н/мм}^2$ ) и температуре до  $400 \div 500^\circ \text{С}$ . При более высоких температурах применение их нежелательно. Размер поверхности кожухотрубных теплообменников достигает  $4000 \text{ м}^2$ , диаметр обычно не превышает  $2000 \text{ мм}$ , длина труб в крупных конструкциях достигает  $9 \text{ м}$ , более  $9 \text{ м}$  теплообменники делают редко, так как затрудняется их изготовление и чистка труб. Как правило, кожухотрубные теплообменники делают сравнительно малого диаметра и большой длины. Это объясняется стремлением увеличить скорости движения теплоагентов и конструктивными соображениями — целесообразно уменьшать диаметр трубной решетки и число соединения труб с решеткой.

Наиболее широко применяют четыре основных типа кожухотрубных теплообменников: жесткой конструкции, теплообменники с компенсаторами температурных напряжений, с U-образными трубками и с плавающей головкой.

Конструкция кожухотрубных теплообменников зависит и от их технологического назначения; например, конденсаторы и испарители имеют увеличенный штуцер для входа или выхода паров и несколько иное, чем в обычных теплообменниках, расположение перегородок в трубном и межтрубном пространстве.

Наиболее прост теплообменник жесткой конструкции (рис. 65). Он состоит из трубного пучка и двух трубных решеток, накрытых крышками. Так как крышки трубных решеток открывают сравни-

тельно часто при чистке и ремонте, их, как правило, делают съемными. Применение камерных крышек (рис. 66) позволяет открывать и ремонтировать трубные решетки, не нарушая присоединения трубопроводов. Для увеличения скорости теплоагента в трубном пространстве теплообменники делают многоходовыми, для этого в крышках располагают перегородки, чтобы теплоагент последовательно проходил отдельные пучки труб (рис. 67). Применяют 2; 3; 4 и 6-ходовые теплообменники. Более 6 ходов обычно не делают, так как это усложняет конструкцию аппарата, кроме того, перегородки занимают часть пло-

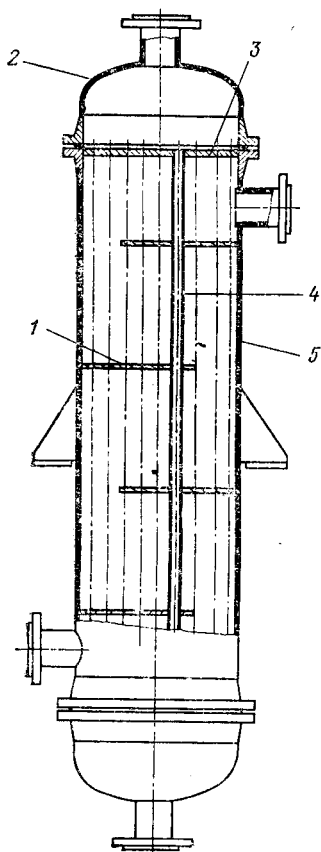


Рис. 65. Одноходовой жесткотрубный теплообменник:

1 — перегородки; 2 — крышка;  
3 — трубная решетка; 4 — трубный пучок; 5 — кожух

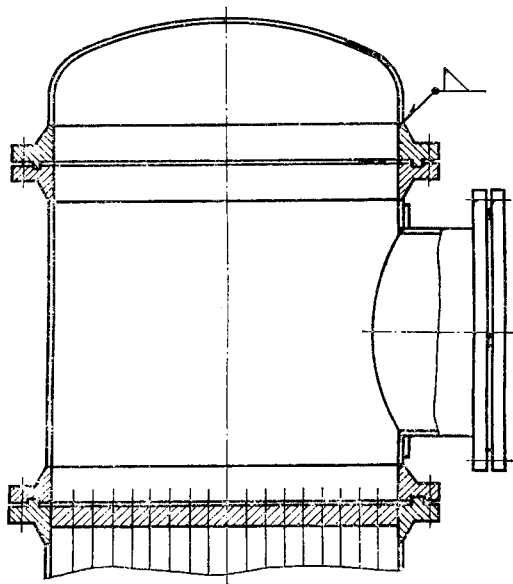


Рис. 66. Камерная крышка теплообменника

щади трубной решетки, в которой размещается меньше трубок. Иногда теплообменники делают двухходовыми и по межтрубному пространству, однако это требует установки в межтрубном пространстве продольных перегородок и хорошего их уплотнения, что представляет известные трудности.

Теплообменники жесткой конструкции можно применять только при небольшой разности температур трубок и кожуха (обычно не более  $30 \div 40^\circ \text{C}$ ). В остальных случаях необходима компенсация

температурных напряжений, возникающих из-за различного теплового расширения кожуха и трубок. В теплообменниках с линзовым компенсатором температурное перемещение кожуха частично воспринимается за счет упругой деформации компенсатора. Установка гибких элементов полностью не устраняет температурные напряжения, но значительно снижает их. Теплообменники данной конструк-

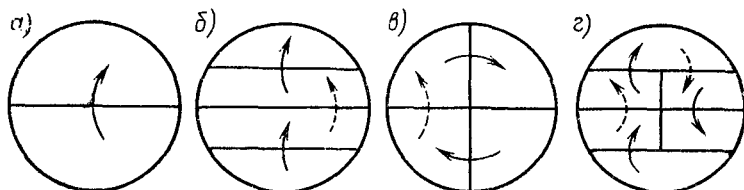


Рис. 67. Схема движения теплоагентов в многоходовых теплообменниках:

а — двухходовой; б — четырехходовой; в — четырехходовой с разбивкой по секторам; г — шестиходовой

ции отличаются от жесткотрубных только тем, что на кожухе приварен линзовый компенсатор. При увеличении давления необходимо увеличивать толщину стенки компенсатора. Это приводит к

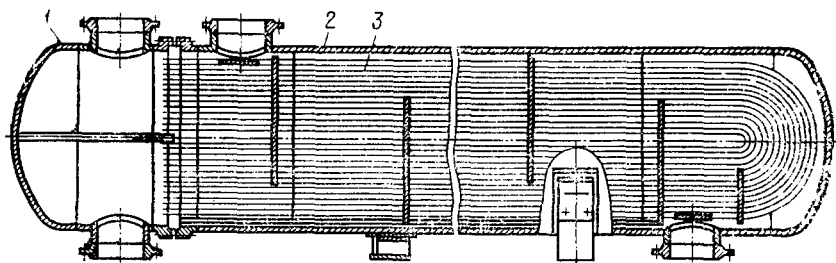


Рис. 68. Теплообменник с U-образными трубами:

1 — камера; 2 — кожух; 3 — трубчатка

увеличению его жесткости, что в свою очередь снижает компенсирующую способность. Поэтому при давлении в межтрубном пространстве более  $1,6 \text{ Н/мм}^2$  теплообменники с линзовым компенсатором на кожухе применяются редко.

Теплообменники с U-образными трубами (рис. 68) и с плавающей головкой применяют в тех случаях, когда требуется постоянная очистка межтрубного пространства или имеются значительные температурные расширения, а высокое давление в межтрубном пространстве не допускает установку компенсатора. В этих аппаратах трубный пучок имеет возможность свободно расширяться независимо от корпуса. Теплообменники данного типа делают горизонтальными, так как при вертикальном положении трубного пучка затрудняется его опорожнение от жидкости или конденсата. Кроме того, при горизонтальном расположении легче выдвигать трубный пучок.

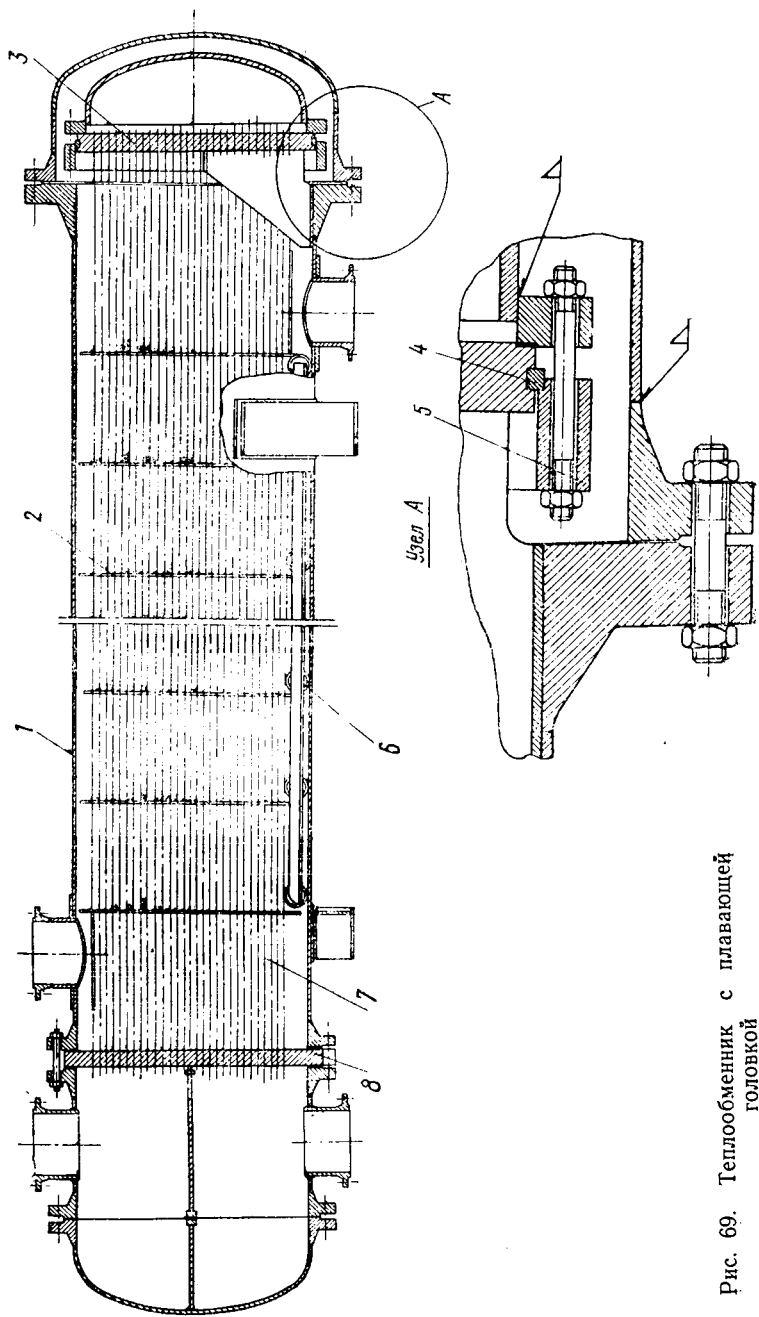


Рис. 69. Теплообменник с плавающей головкой

В теплообменнике с U-образными трубками трубный пучок набирают из изогнутых трубок. По своей конструкции он двухходовой. Трубный пучок может быть сравнительно легко извлечен из аппарата. Недостаток такого теплообменника — трудность очистки изогнутых трубок и минимально допустимый радиусгиба труб ( $3 \div 4d_n$ ), не позволяющий заполнить трубками середину U-образного теплообменника. Для увеличения скорости среды в пустое пространство между трубками иногда устанавливают вытеснители в виде коробок, занимающих часть его объема.

В теплообменниках с плавающей головкой (рис. 69) возможна очистка как трубок, так и межтрубного пространства. Один конец

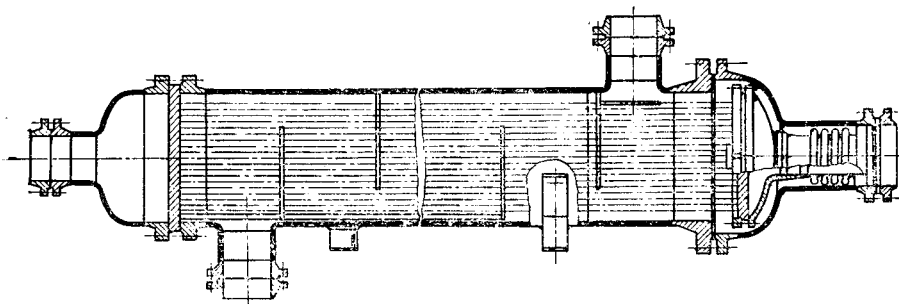


Рис. 70. Теплообменник с плавающей головкой и компенсатором на центральной трубе

трубок 7 связан с жестко закрепленной решеткой 8, а второй — со свободно перемещающейся 3. Для уменьшения диаметра кожуха 1 крышку плавающей головки присоединяют с помощью малогабаритного фланца 5. Для удобства извлечения тяжелого трубного пучка его опирают с помощью перегородок 2 на тележку с роликами 6. При конструировании теплообменников любого типа стремятся по возможности уменьшить зазор между трубным пучком и кожухом. Для этого в теплообменнике плавающую головку выносят в расширенную часть кожуха (съемный фланец на трубной решетке крепят разъемным кольцом 4), что позволяет существенно уменьшить этот зазор. Теплообменники с плавающей головкой имеют четное число ходов (обычно два или четыре хода).

Теплообменники, в которых центральный штуцер плавающей головки соединен с крышкой с помощью компенсатора (рис. 70), — одноходовые. Они могут быть установлены без особых затруднений и вертикально.

**Основные элементы кожухотрубных теплообменников.** Основным элементом кожухотрубных теплообменников — трубы. Масса трубного пучка обычно составляет 60—80% от массы аппарата. Чем меньше диаметр труб, тем теплообменник компактнее и меньше расход металла, но существенно повышается трудоемкость изготовления аппарата и затрудняется его очистка.

В настоящее время для стальных и титановых теплообменников широко применяют трубы размером  $25 \times 2$ ;  $20 \times 2$  мм. Трубки большего диаметра применяют только при выделении отложений из теплоагентов. До недавнего времени кожухотрубные теплообменники изготовляли из бесшовных труб; в настоящее время начали применять дешевые электросварные трубы. Медные теплообменники для установок глубокого холода изготавливаются с трубками диаметром до 6 мм.

Когда коэффициенты теплоотдачи по обе стороны стенки существенно различаются, применяют оребренные трубы, что дает возможность развить поверхности с той стороны, где коэффициент теплоотдачи меньше. Например, в калориферах или воздушных холодильниках ребра располагают со стороны воздушного простран-

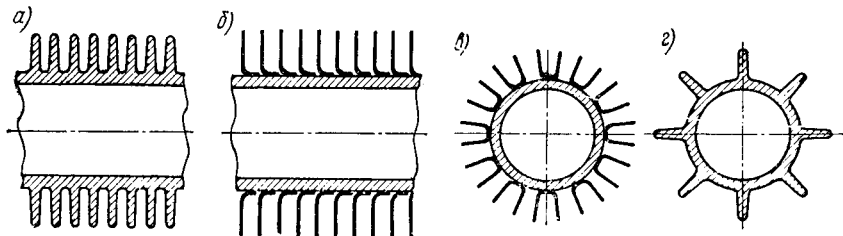


Рис. 71. Типы оребренных труб:

а — с накатанными ребрами; б — с приварными ребрами; в — с продольными приварными ребрами; г — цельнотянутая с продольными ребрами

ства. Применение оребрения позволяет значительно сократить расход металла на единицу теплообменной поверхности. Существует несколько способов выполнения оребрения. Один из способов — накатка ребер на трубах из пластичных материалов (рис. 71). При присоединении ребер к поверхности труб необходимо обеспечить хороший контакт ребер с поверхностью трубы, в противном случае эффективность ребер резко снижается. Когда ребра приварены к поверхности трубы, теплопередача через сварной шов вполне удовлетворительна; если ребра насаживают на трубы без сварки, то посадка должна быть возможно более плотной.

Крепление труб в трубной решетке. Крепление должно быть прочным, плотным и вместе с тем обеспечивать легкую замену поврежденной трубы. Раньше основным способом крепления труб из пластичных материалов была развальцовка. Развальцовывают с помощью специального инструмента — вальцовки, имеющей вращающиеся ролики, которые во время вращения раздвигаются с помощью конуса и расширяют конец трубы. Конец трубы пластически деформируется и плотно прижимается к стенкам гнезда. Материал решетки должен быть тверже, чем материал трубы, чтобы многократно заменять трубы и обеспечивать целостность гнезда. При давлении в теплообменнике свыше  $1,6 \text{ Н/мм}^2$  для увеличения сопротивления вырыванию на поверхности гнезд протачивают канавки, а концы труб разбортовывают.

В последнее время развальцовку труб с успехом заменяют сваркой. Сварное соединение позволяет уменьшить толщину трубной решетки и шаг труб. Оно более надежно по сравнению с развальцовкой, так как обеспечивает лучшую герметичность. В случаях, когда смешение продуктов в теплообменнике недопустимо, обварка

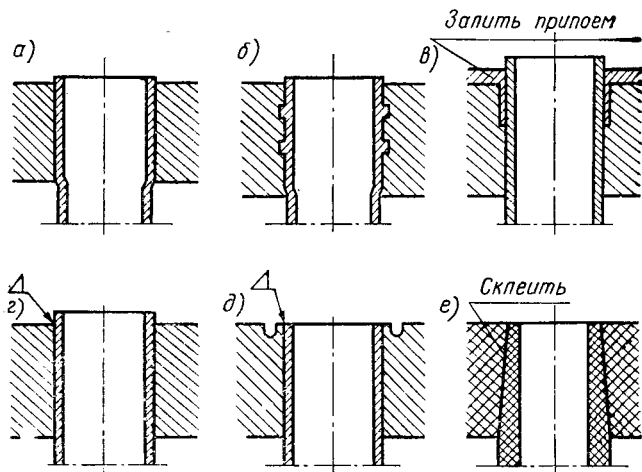


Рис. 72. Способы крепления труб в трубной решетке:  
а, б — развальцовка; в — пайка; г, д — сварка; е — склейка

труб обязательна. Когда корродирующая среда находится только в трубном пространстве, применение сварки дает возможность использовать трубные решетки из двухслойной стали, при этом

плакирующий слой, обращенный в сторону трубного пространства, сваривается с трубами из кислотостойкой стали. Крепят трубы по одному из вариантов, показанных на рис. 72. С точки зрения технологии сварки наиболее совершенным следует

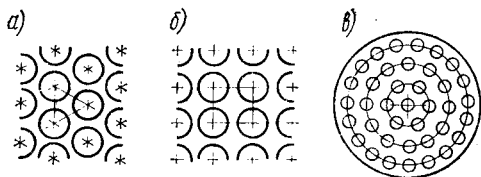


Рис. 73. Разбивка труб в трубной решетке

заканное на рис. 72, д. Однако оно более трудоемко, так как требует дополнительной выточки кольцевых пазов в трубной решетке. Трубы графитовых теплообменников приклеивают специальными полимерными материалами.

Чем меньше шаг между трубами, тем более компактен теплообменник. Минимальное значение шага ограничивается условиями развальцовки (нужен определенных размеров «мостик»).

Трубы располагают в трубной решетке по вершинам квадратов (рис. 73, а), тогда трубный пучок более доступен для очистки снаружи или равносторонних треугольников (рис. 73, б). Эта схема

компактна и чаще применяется. Расположение по концентрическим окружностям (рис. 73, в) применяют редко. Диаметр кожуха теплообменника берут таким, чтобы внутри него расположилось необходимое число труб и остались небольшие зазоры между трубами и кожухом. Диаметр кожуха округляют до ближайшего стандартного размера. Ориентировочное число труб при расположении их по вершинам треугольника с шагом  $t$  в кожухе диаметром  $D$  будет

$$n = K\pi D^2 / (3,47t^2),$$

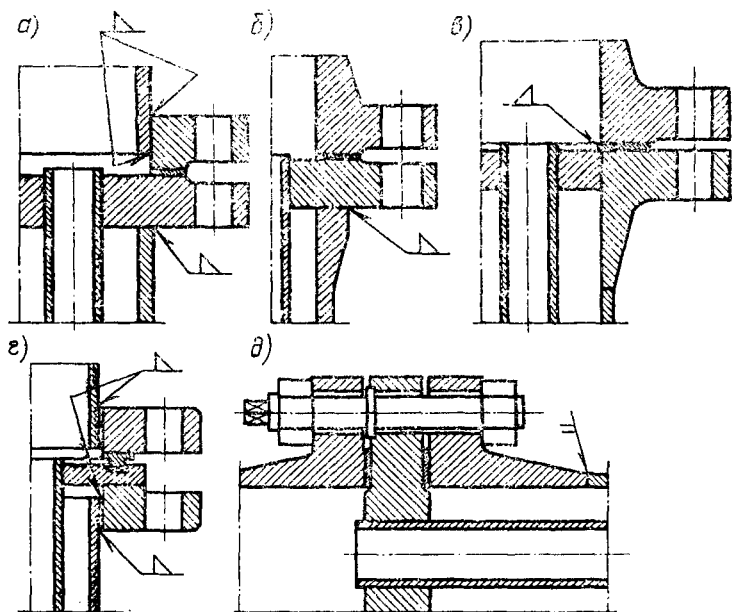


Рис. 74. Способы соединения трубной решетки с кожухом

где  $K=0,7 \div 0,85$  (меньшее значение  $K$  относится к теплообменникам с малым числом труб и к многоходовым теплообменникам).

Окончательное число труб определяют по таблицам [3] или путем вычерчивания трубного пучка в крупном масштабе.

Кожух к трубной решетке обычно приваривают. На рис. 74, а, б показано соединение, в котором трубная решетка составляет одно целое с фланцем. Когда решетка тоньше фланца, применяют соединение, данное на рис. 74, в. Для теплообменников из кислотостойкой стали находит применение вариант, показанный на рис. 74, г. Когда трубный пучок вынимают из кожуха, применяют разъемное соединение, изображенное на рис. 74, д. Несколько шпилек соединения делают с утолщениями, которые позволяют снимать крышку, не нарушая соединения решетки с фланцем кожуха.

Поперечные перегородки в межтрубном пространстве служат для сообщения необходимого направления потоку теплоагента и одно-

временно поддерживают трубный пучок. Для обеспечения зигзагообразного хода теплоагента обычно устанавливают перегородки в виде кругов с сегментным вырезом (рис. 75), но иногда применяют перегородки с вырезами в виде секторов или комплекта кругов и колец, расположенных последовательно. Толщину перегородок

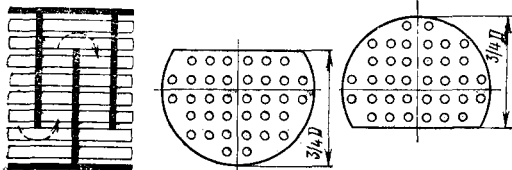


Рис. 75. Сегментные перегородки в межтрубном пространстве

в зависимости от диаметра аппарата делают  $5 \div 10$  мм, отверстия под трубы — на  $1,0 \div 1,5$  мм больше наружного диаметра труб. Крепят перегородки обычно с помощью стержней, расположенных между трубками. В испарителях и кон-

денсаторах перегородки необходимы только для поддержания трубного пучка, их располагают таким образом, чтобы не мешать нормальному выходу пара или стоку конденсата. Для уплотнения перегородок в камерах трубного пространства на трубной решетке делают паз, в который укладывают прокладку. При уплотнении

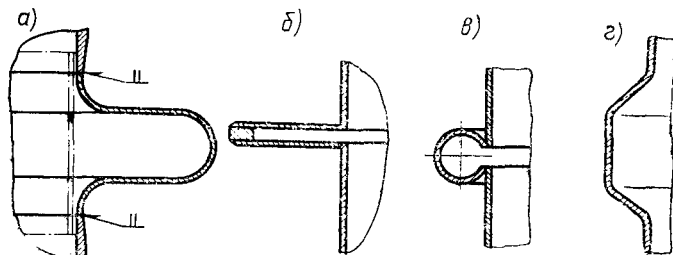


Рис. 76. Компенсаторы

крышки теплообменника кромка перегородки упирается в прокладку. Наиболее распространенная конструкция линзового компенсатора показана на рис. 76, а. Компенсатор должен обладать большой гибкостью, поэтому его делают значительно тоньше кожуха теплообменника. Вследствие небольшой толщины и сложного характера нагрузки (наряду с напряжениями от давления на компенсатор действуют значительные усилия, возникающие от его сжатия или растяжения) компенсатор — весьма ответственный элемент аппарата.

Линзовый компенсатор, изображенный на рис. 76, а, изготовляют путем сварки из  $4 \div 8$  штампованных элементов. Иногда в компенсатор вставляют направляющую втулку, чтобы уменьшить гидравлическое сопротивление потока. Когда невозможно изготовить линзовый компенсатор, применяют компенсаторы, изготовленные из плоских листов или изогнутых трубок (рис. 76, б, в); имеются конструкции, в которых компенсатором температурных напряжений служит утолщенная часть корпуса (рис. 76, г).

Витые теплообменники. Состоят из пучков труб малого диаметра, спирально закрученных и соединенных с двумя трубными решетками (рис. 77). Они обеспечивают большую поверхность теплообмена и хороший коэффициент теплопередачи. Спирально намотанные трубы легко воспринимают температурные удлинения. Благодаря малому диаметру трубок эти аппараты могут работать при значительных давлениях в трубном пространстве. Витые теплообменники применяются, в основном в криогенной технике.

Воздушные холодильники и конденсаторы. Значительную часть теплообменной аппаратуры составляют холодильники и конденсаторы, которые на крупных предприятиях потребляют очень большое количество охлаждающей воды. При этом затраты на водоснабжение и охлаждение отходящей воды очень велики, а очистка воды представляет зачастую большие трудности. Чтобы уменьшить расход воды на охлаждение, водяные холодильники заменяют воздушными. Основные элементы аппарата воздушного охлаждения — пучок оребренных труб и мощный осевой вентилятор, создающий интенсивный поток воздуха через трубный пучок. Кроме аппарата горизонтального типа, изображенного на рис. 78, применяют вертикальные теплообменники и с наклонным расположением теплообменных секций шатрового и зигзагообразного типа. В воздушных теплообменниках продукт подается в трубное пространство. Увеличение в  $5 \div 20$  раз наружной поверхности труб за счет оребрения компенсирует неудовлетворительную теплоотдачу, которая со стороны воздуха значительно хуже, чем со стороны продук-

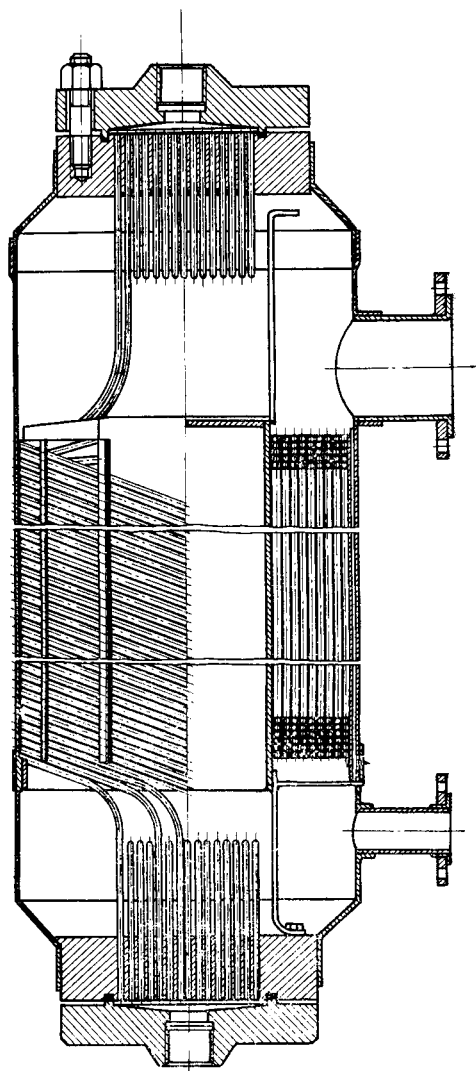


Рис. 77. Витой теплообменник

та. В редких случаях, когда коэффициент теплоотдачи со стороны продукта приближается по значению к коэффициенту теплоотдачи со стороны воздуха, можно использовать гладкие трубы. Конечная температура продукта в воздушных холодильниках  $\geq 40^\circ \text{C}$ . В зимнее время вентилятор обычно выключают и теплопередача осуществляется за счет естественной конвекции.

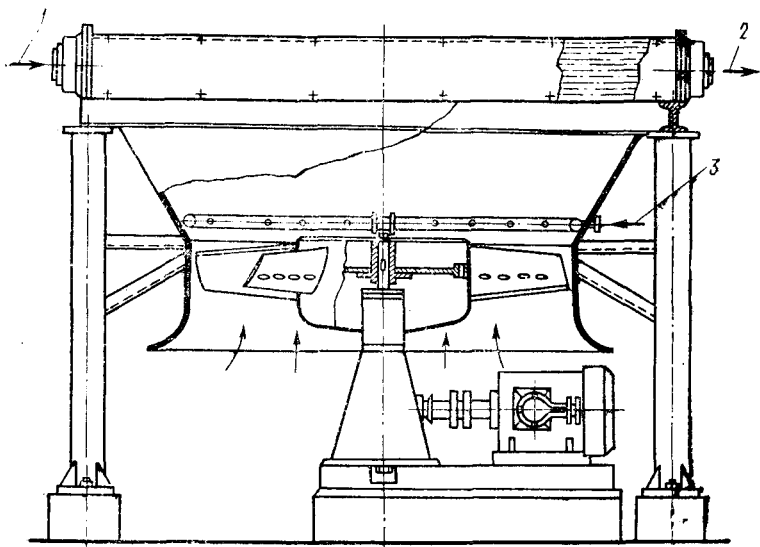


Рис. 78. Холодильник воздушного охлаждения:  
1 — вход продукта; 2 — выход продукта; 3 — вход воды для увлажнения воздуха

### § 3.3. Расчет кожухотрубных теплообменников

Усилия, действующие в кожухотрубных теплообменниках. Основные размеры теплообменника определяют по результатам теплового и гидравлического расчета. Механический (прочностной) расчет начинают с определения усилий, действующих на теплообменник.

Температурные напряжения в теплообменниках жесткой конструкции возникают при различной температуре труб и кожуха, а также, когда температура их одинакова, но трубы и кожух изготовлены из разных материалов, коэффициенты удлинения которых сильно отличаются. Рассмотрим наиболее распространенный случай, когда трубы 1 имеют более высокую температуру, чем кожух 2 (рис. 79). Если трубы и кожух не будут связаны между собой, то между ними должен образоваться зазор  $\delta = l(\alpha_t t_t - \alpha_k t_k)$ , где  $\alpha_t$ ;  $\alpha_k$  — коэффициенты линейного расширения соответственно труб и кожуха,  $^\circ \text{C}^{-1}$ ;  $t_t$  — температура труб;  $t_k$  — температура кожуха.

В действительности корпус и трубки между собой связаны. Поскольку целостность конструкции не должна нарушаться, трубки

будут сжаты на  $\delta_T$ , а корпус растянут на  $\delta_K$  и тогда закон равенство

$$\delta = \delta_T + \delta_K. \quad (47)$$

Усилие сжатия трубок равно усилию растяжения кожуха:  $Q_T = Q_K = Q$ .

По закону Гука,  $\delta_T = Ql / (E_T F_T)$ ;  $\delta_K = Ql / (E_K F_K)$ , где  $E_T$  и  $E_K$  — модули упругости материалов трубы и кожуха, Н/мм<sup>2</sup>;  $F_T$  и  $F_K$  — площади поперечного сечения труб и корпуса, мм<sup>2</sup>.

Подставляя значения  $\delta$ ;  $\delta_T$ ;  $\delta_K$  в (47), получим

$$Q = (\alpha_T t_T - \alpha_K t_K) / [1 / (E_T F_T) + 1 / (E_K F_K)]. \quad (48)$$

В трубах и в кожухах температурные напряжения

$$\sigma_T = Q / F_T; \quad \sigma_K = Q / F_K.$$

Действующее на одну трубу усилие  $q = Q/n$ , где  $n$  — число труб.

В зависимости от распределения температур это усилие может быть сжимающим или растягивающим.

Когда трубы и кожух выполнены из одинакового материала, последние формулы упрощаются:

$$\sigma_T = \alpha (t_T - t_K) E F_K / (F_T + F_K); \quad \sigma_K = \alpha (t_T - t_K) E F_T / (F_T + F_K).$$

Площадь сечения труб  $F_T = \pi (d_b^2 - d_{вн}^2) n / 4$ , где  $d_b$  — наружный диаметр труб, мм;  $d_{вн}$  — внутренний диаметр труб, мм.

Площадь сечения корпуса  $F = \pi D_{ср} s$ , где  $D_{ср}$  — средний диаметр кожуха, мм;  $s$  — толщина стенки кожуха, мм.

При наличии на кожухе линзового компенсатора температурные напряжения определяют следующим образом. Удлинение одной линзы компенсатора (мм) пропорционально осевой силе:  $\delta_{л'} = yQ$ , где

$$y = 0,06 \alpha_1 (1 - \beta) D^2 / (\pi E s^3) \quad (49)$$

— коэффициент, определяющий гибкость компенсатора, мм/Н;  $\beta = D / D_{л}$  — отношение диаметра аппарата к диаметру компенсатора;  $\alpha_1$  — коэффициент, зависящий от  $\beta$  (табл. 15);  $D$  — диаметр аппарата, мм;  $E$  — модуль упругости материала, Н/мм<sup>2</sup>;  $s$  — толщина стенки линзы, мм.

В случае установки линзы (47) принимает вид

$$\delta = \delta_T + \delta_K + \delta_{л'}, \quad (50)$$

где  $\delta_{л'} = \delta_{л'}' z = yQz$ ;  $z$  — число линз на кожухе аппарата.

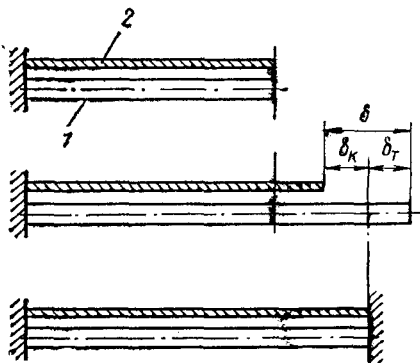


Рис. 79. Схема температурных деформаций трубок и корпуса теплообменника

| $\beta$ | $\alpha_1$ | $\lambda$ | $\beta$ | $\alpha_1$ | $\lambda$ |
|---------|------------|-----------|---------|------------|-----------|
| 0,48    | 7,17       | 0,215     | 0,80    | 0,31       | 0,047     |
| 0,52    | 5,07       | 0,214     | 0,84    | 0,181      | 0,040     |
| 0,56    | 3,60       | 0,184     | 0,86    | 0,130      | —         |
| 0,60    | 2,52       | 0,157     | 0,88    | 0,090      | —         |
| 0,64    | 1,76       | 0,134     | 0,90    | 0,060      | —         |
| 0,68    | 1,20       | 0,112     | 0,92    | 0,036      | —         |
| 0,72    | 0,81       | 0,094     | 0,94    | 0,027      | —         |
| 0,76    | 0,51       | 0,076     |         |            |           |

Подставляя значения  $\delta_i \delta_T$ ;  $\delta_K$  и  $\delta_L$  в (50), получаем

$$Q = (\alpha_T t_T - \alpha_K t_K) / [1/(E_T F_T) + 1/(E_K F_K) + yz]. \quad (51)$$

Как показывают расчеты, осевая сила  $Q$  при установке компенсатора уменьшается во много раз.

По расчету на давление минимальная толщина стенки компенсатора

$$s = 0,21 (D_L - D) \sqrt{(1,25 p_{\text{гидр}}) / \sigma_T} + c, \quad (52)$$

или

$$s = \lambda D \sqrt{(1,1 p_{\text{гидр}}) / \sigma_T} + c, \quad (53)$$

где  $D_L$  — наружный диаметр компенсатора (линзы);  $p_{\text{гидр}}$  — давление гидравлического испытания;  $\sigma_T$  — предел текучести при рабочей температуре;  $\lambda$  — коэффициент, определяемый по табл. 17.

Необходимо также проверять напряжения в компенсаторе от деформации:

$$\sigma = (40/3) y Q E s / (D^2 \alpha_1). \quad (54)$$

Если напряжения получаются чрезмерно большими, необходимо устанавливать дополнительные линзы, чтобы уменьшить осевое усилие. Компенсаторы стальных аппаратов нормализованы.

Температуры стенок труб и кожуха определяют тепловым расчетом. Необходимо иметь в виду, что они могут значительно отличаться от температуры теплоносителей. Например, при наличии в межтрубном пространстве конденсирующихся паров, имеющих высокий коэффициент теплоотдачи, а в трубном пространстве — холодной жидкости температура труб и кожуха практически одинакова, несмотря на значительную разность температур между теплоносителями.

Тепловой расчет необходимо вести по наихудшему варианту, например в пусковой период могут возникнуть температурные напряжения, значительно более высокие, чем при нормальном режиме работы. В некоторых ответственных аппаратах разрабатывают даже специальный пусковой температурный режим, чтобы не допустить при пуске чрезмерных температурных напряжений.

В теплообменниках с плавающей головкой и с U-образными трубками температурные напряжения отсутствуют. В многоходовых теплообменниках при значительном перепаде температуры теплоносителя возможны также температурные напряжения вследствие разности температур труб в разных точках трубного пучка. Компенсировать эти напряжения невозможно.

В жестком кожухотрубном теплообменнике за счет давления как в трубках, так и в кожухе всегда возникают напряжения растяжения (рис. 80). Усилие, растягивающее корпус и трубы,

$$Q = p_m \frac{\pi}{4} (D^2 - nd_v^2) + p_t \frac{\pi}{4} D^2 - p_t \frac{\pi}{4} (D - nd_{вн}^2) =$$

$$= p_m \frac{\pi}{4} (D^2 - nd_v^2) + p_t \frac{\pi}{4} nd_{вн}^2, \quad (55)$$

где  $p_m$  и  $p_t$  — давления в межтрубном и трубном пространствах, Н/мм<sup>2</sup>;  $D$  — внутренний диаметр кожуха, мм;  $d_v$  и  $d_{вн}$  — внешний и внутренний диаметры труб, мм;  $n$  — число труб.

Если не принимать во внимание деформацию изгиба трубной решетки, считая ее достаточно жесткой, то в корпусе и трубках напряжения растяжения

$$\sigma_k = \sigma_t = Q / (F_t + F_k). \quad (56)$$

Усилие, растягивающее одну трубу при условии равномерного распределения нагрузки,

$$q_p = \sigma_t f_t = \sigma_t \frac{\pi}{4} (d_v^2 - d_{вн}^2). \quad (57)$$

В теплообменниках с линзовым компенсатором, так же как и в теплообменниках жесткой конструкции, под действием давления возникают только растягивающие напряжения. Осевые усилия определяют по (55), но при этом вместо внутреннего диаметра кожуха  $D$  подставляют диаметр линзы  $D_{л}$ .

С достаточной точностью можно считать, что осевое усилие в теплообменниках с линзовым компенсатором воспринимается только трубным пучком, тогда усилие, действующее на одну трубку,

$$q_p = Q / n. \quad (58)$$

В теплообменниках с плавающей головкой и U-образных усилия, действующие на одну трубку, от давления в трубном пространстве (усилие растягивающее)

$$q_p = p_t d_{вн}^2 \pi / 4, \quad (59)$$

от давления в межтрубном пространстве  $q_p = p_m d_v^2 \pi / 4$  — усилие сжимающее.



Рис. 80. К расчету усилий в теплообменнике

На неподвижную трубную решетку этих теплообменников действуют усилия  $Q = pD^2\pi/4$ , где  $p$  — давление в трубном или межтрубном пространстве (выбирают наибольшую величину).

Трубы рассчитывают по наибольшей нагрузке, причем необходимо иметь в виду, что сжимающее усилие более опасно, так как вызывает продольный изгиб.

Трубный пучок крупных теплообменников имеет значительный вес, который в некоторых случаях следует учитывать. В вертикальных аппаратах вес трубного пучка можно рассматривать как нагрузку, равномерно распределенную по поверхности решетки. Эту нагрузку суммируют с давлением. В горизонтальных теплообменниках большой длины трубы рассчитывают на изгиб под действием собственного веса и веса жидкости в трубах.

Если трубный пучок имеет поперечные перегородки, то трубы рассчитывают как многоопорные балки, где перегородки рассматривают как опоры. Температурные напряжения, усилия от давления, а иногда и весовые нагрузки суммируются. При суммировании необходимо учитывать знак напряжений или усилий.

**Расчет трубных решеток.** Трубные решетки рассчитывают как перфорированные круглые пластины, нагруженные давлением. Влияние укрепляющего действия трубок и способы закрепления решетки учитываются введением соответствующих коэффициентов. Дополнительно проверяют толщину решетки по условиям надежности развальцовки.

Толщину трубной решетки теплообменников жесткого типа можно рассчитывать по ОСТ 26-1185—75, возможен расчет и по следующей упрощенной методике. Толщину стенки принимают по наибольшему из двух значений:

$$s = \frac{c_m D}{2} \sqrt{\frac{0,2p_m}{[\sigma]\psi}} + c + c_1; \quad (60)$$

$$s = 1,1 k_1 c_\tau D \sqrt{\frac{0,2p_\tau}{[\sigma]\psi}} + c + c_1, \quad (61)$$

где  $\psi = (t - d_b)/t$  — коэффициент ослабления решетки отверстиями;  $t$  — шаг трубок;  $d_b$  — внешний диаметр трубок;  $k_1 = 0,55 \div 0,6$  — коэффициент, определяемый по табл. 12 из ГОСТ 14249—73;  $c_m =$

$$= \sqrt{1/(2\rho + 3)}; \quad c_\tau = \sqrt{(2\rho + 1)/(2\rho + 3)};$$

$$\rho = [E_\tau n(d_b^2 - d_{вн}^2)\pi/4]/(E_K D s_K) \quad (62)$$

— отношение жесткости труб к жесткости кожуха;  $s_K$  — толщина стенки кожуха;  $E_\tau$  и  $E_K$  — модули упругости материала трубок и корпуса соответственно.

Если коррозия протекает с обеих сторон трубной решетки, то следуют две прибавки  $c$  на коррозию. При относительно тонких

в результате прогиба трубных решеток под действием давления часть труб, расположенных ближе к центру, может работать на продольный изгиб. Если в этих случаях отсутствуют поперечные перегородки, укрепляющие трубный пучок, а также если трубный пучок вследствие коррозии быстро выходит из строя, то не следует принимать во внимание укрепляющее действие труб, а трубную решетку жесткого теплообменника следует рассчитывать по формуле, приведенной для U-образных теплообменников, у которых укрепляющее действие труб полностью отсутствует.

Толщину трубной решетки теплообменника с плавающей головкой и U-образными трубами определяют по формуле

$$s = 0,238 D_{с.п} \sqrt{p/([\sigma]\psi)} + c + c_1, \quad (63)$$

где  $D_{с.п}$  — средний диаметр прокладки.

Толщина трубной решетки теплообменника с линзовым компенсатором

$$s = 0,21 D \sqrt{k p_T / ([\sigma]\psi)} + c + c_1, \quad (64)$$

где  $p_T$  — расчетное давление в трубном пространстве, Н/мм<sup>2</sup>;

$$k = 1 + \frac{p_k}{p_T} \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} + \frac{Q_k}{D^2 p_T \pi / 4}; \quad Q_k = [\alpha_T (t_T - t_c) - \alpha_k (t_k - t_c)] l / (y z)$$

— усилие в компенсаторе, Н/мм;  $\alpha_T$  и  $\alpha_k$  — коэффициенты линейного расширения материала труб и корпуса соответственно;  $t_T$  и  $t_k$  — температура стенки труб и корпуса;  $t_c = 20^\circ \text{C}$  — температура, при которой изготовлен аппарат;  $l$  — длина трубчатки, мм;  $y$  — коэффициент гибкости компенсатора, мм/Н;  $z$  — число линз.

Наряду с определением толщины стенки проверяют надежность закрепления труб в трубной решетке. Для вальцованных соединений определяют усилие, приходящееся на единицу длины периметра трубки:

$$\sigma = q / \pi d_n, \quad (65)$$

где  $q = q_T + q_p$  — суммарная сила, действующая на наиболее нагруженную трубку.

Удельное усилие  $\sigma$  не должно превышать 4 Н/мм при развальцовке отверстий с канавками и отбортовкой конусов. Сварное соединение рассчитывается на срез:

$$\tau = q / [\pi d_n (\delta - c) \varphi], \quad (66)$$

где  $\delta$  — катет сварного шва, мм;  $c$  — прибавка на коррозию, мм;  $\varphi$  — коэффициент прочности сварного шва.

Остальные элементы теплообменника (крышки, фланцы и др.) рассчитывают по общепринятым формулам.

Змеевиковые теплообменники более громоздки и металлоемки по сравнению с кожухотрубными. Их используют при высоких температурах и давлениях и малом расходе одного из теплоагентов, когда применение кожухотрубных нежелательно или когда приняты конструкционные материалы, из которых невозможно или очень трудно изготовить кожухотрубный теплообменник.

По форме различают спиральные и петлевые (зигзагообразные) змеевики. Простейшие змеевиковые теплообменники — погружные, представляющие собой змеевик, погруженный в какой-либо сосуд. Их широко применяют в качестве теплообменных элементов реакционных емкостных аппаратов. Использование погружных спиральных змеевиков как самостоятельных теплообменных аппаратов нецелесообразно из-за их

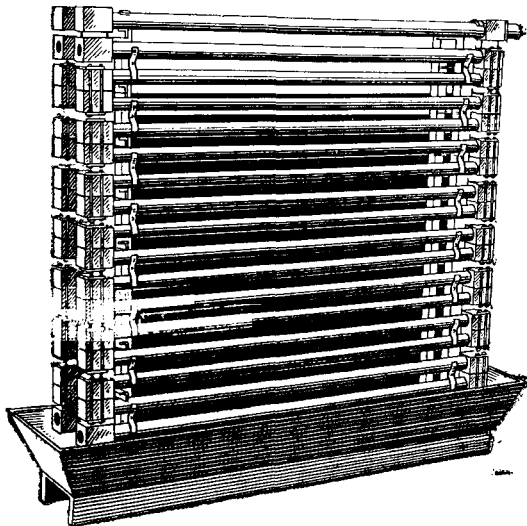


Рис. 81. Оросительный теплообменник из графитовых труб

громоздкости и плохой теплопередачи. В отличие от них оросительные змеевиковые теплообменники являются вполне современной конструкцией. Эти теплообменники (холодильники и конденсаторы) представляют собой петлевые змеевики с горизонтально расположенными трубами, над которыми устанавливают оросительные устройства с отверстиями для воды. Под змеевиком устанавливают поддон для сбора охлаждающей воды. Достоинство этих теплообменников — высокий коэффициент теплопередачи

и сравнительно малый расход охлаждающей воды вследствие частичного ее испарения. Оросительные теплообменники из свинца, ферросилида, графита (рис. 81) и других кислотостойких материалов широко применяют при работе с кислотами.

Теплообменники «труба в трубе» используют как нагреватели, испарители и реакционные аппараты («скоростные трубчатки»). Подбирая диаметр наружной трубы, в этих теплообменниках можно добиться высоких скоростей и коэффициентов теплоотдачи даже при малых расходах обоих теплоносителей. Наиболее просты по конструкции теплообменники с приварной наружной трубой (рис. 82), которые могут быть цельносварными или иметь съемные калачи для прочистки. Расстояние между горизонтальными трубами стремятся уменьшить, для чего применяют крутозагнутые отво-

ды. В многорядных змеевиках калачи иногда располагают наклонно.

В случае значительных температурных напряжений на наружную трубу устанавливают линзовые компенсаторы, что значительно усложняет конструкцию теплообменника. В нефтеперерабатывающей промышленности применяют полностью разборные теплообменники (рис. 83), которые допускают чистку обеих полостей, а также обеспечивают свободное расширение внутренних труб. Недостаток данной конструкции — большое число разъемных соединений. Иногда внутренние трубы теплообменников «труба в трубе» снабжают продольными ребрами, что целесообразно, когда коэффициенты теплоотдачи с внутренней стороны значительно выше, чем с наружной.

Если сварить внутреннюю и наружную трубы нельзя, а в кольцевое пространство подается нейтральное вещество (например, охлаждающая вода), то соединить их можно с помощью сальникового

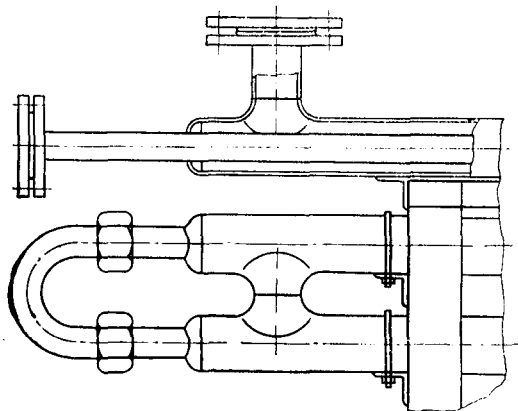


Рис. 82. Сварной теплообменник «труба в трубе» со съемными калачами

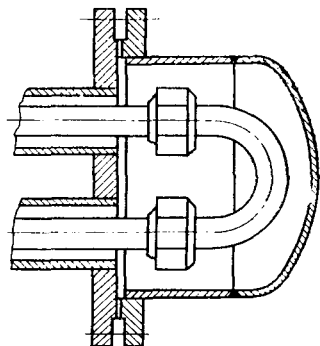


Рис. 83. Элемент разборного теплообменника «труба в трубе»

уплотнения. Подобное соединение применяют для труб, выполненных из стекла, графита или ферросилида.

Длину труб теплообменников «труба в трубе» стремятся сделать возможно большей насколько это позволяють условия прочности (обычно не более  $3 \div 6$  м).

Спиральный теплообменник (рис. 84) состоит из двух спиральных каналов, навитых вокруг центральной перегородки. Ширина кольцевой щели  $5 \div 25$  мм (постоянная ширина щели обеспечивается за счет приварки дистанционных штифтов). Спиральные теплообменные аппараты применяют в качестве теплообменников, конденсаторов и испарителей. Одно из назначений спиральных теплообменников — нагревание и охлаждение высоковязких жидкостей; так как вязкая жидкость проходит по одному каналу,

то устраняется проблема равномерного распределения жидкости по трубам.

По способу уплотнения торцов теплообменники делятся на три основных вида: 1) тупиковые каналы (рис. 85, а), когда каждый заваривается с противоположной стороны с помощью вставной ленты (полностью исключается возможность смешения теплоносителей и допускается прочистка обоих каналов); 2) глухой канал (рис. 85, б), когда необходимо полностью исключить утечку одного из теплоносителей (глухой канал не допускает прочистки); 3) сквоз-

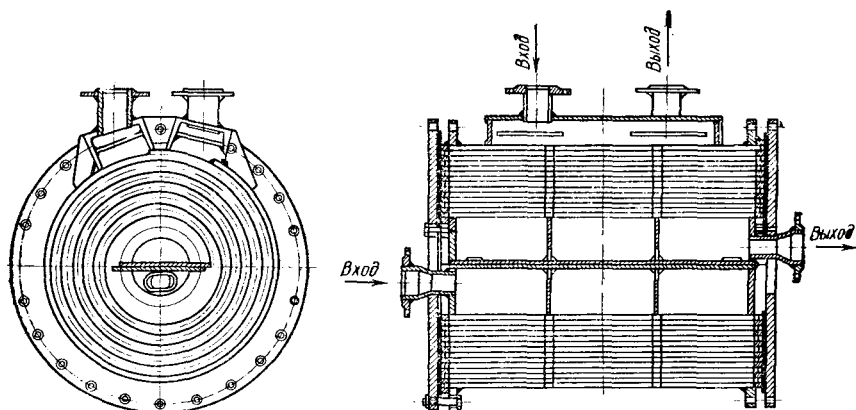


Рис. 84. Горизонтальный спиральный теплообменник

ные каналы, открытые с торцов, допускают чистку обеих полостей, уплотнение их обеспечивается с помощью прокладок (рис. 85, в) или U-образных манжет. Особое положение занимают теплообмен-

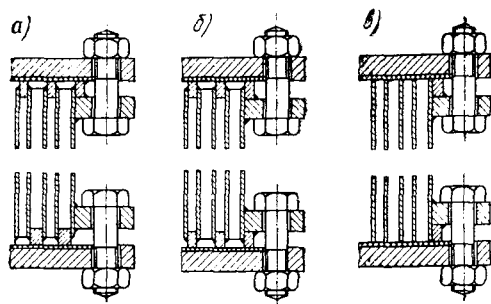


Рис. 85. Уплотнение крышек спиральных теплообменников

ники с одним сквозным каналом, которые используют в качестве дефлегматоров ректификационных колонн.

Спиральные теплообменники устанавливают как вертикально, так и горизонтально. Когда они используются в качестве конденсаторов или испарителей, их устанавливают только вертикально. Они обеспечивают развитую поверхность и сравнительно высокий коэффициент теплопередачи при

малом гидравлическом сопротивлении, однако их применяют значительно реже, чем кожухотрубные.

Пластинчатые теплообменники [6]. Состоят из ряда тонких параллельных пластин, между которыми движутся тепло-

агенты. Пластинчатые теплообменники имеют самые высокие технико-экономические характеристики по сравнению с теплообменниками других типов. Они имеют самую большую удельную поверхность на единицу объема и массы. Большая поверхность теплообмена позволяет осуществить «мягкий» обогрев, т. е. нагрев жидкости в тонком слое при малой разности температур между теплоагентами (до  $1,5 \div 2^\circ \text{C}$ ), поэтому они особенно удобны при работе с термочувствительными веществами. Возможность разборки пластин делает теплообменные поверхности доступными для осмотра, прочистки и промывки, что особенно удобно при работе с загрязненными, вязкими и застывающими жидкостями. Недостаток пластинчатых теп-

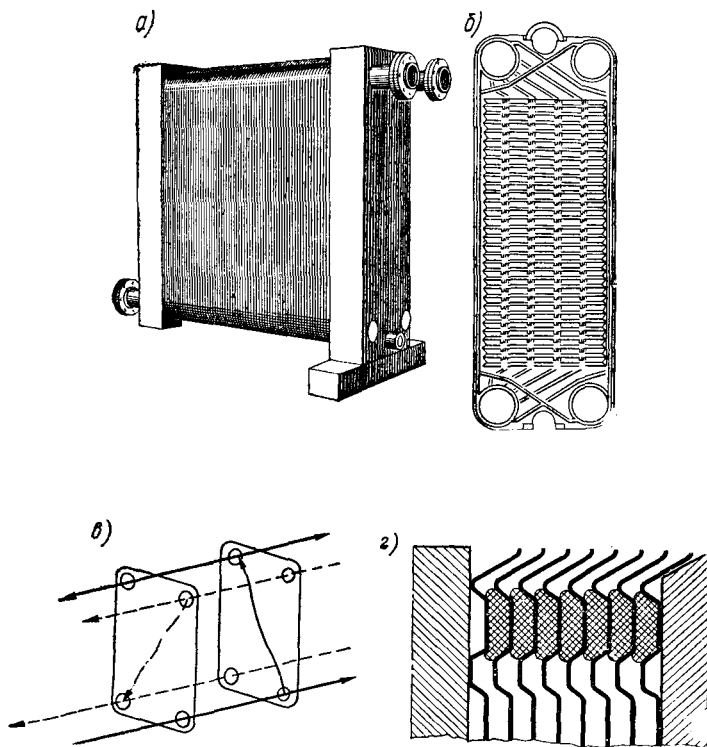


Рис. 86. Пластинчатый теплообменник

лообменников — большой периметр уплотняемых соединений, что усложняет их герметизацию.

Аппарат, общий вид которого показан на рис. 86, а, состоит из группы теплообменных рифленых пластин (рис. 86, б), подвешенных на горизонтальной штанге. При помощи нажимной плиты пластины сжимаются в один пакет; при зажатии пластин происходит

уплотнение полостей между пластинами с помощью прокладок. Как видно из схемы движения теплоагентов (рис. 86, в), оба теплоносителя вводятся через четыре сквозных канала, образованных отверстиями в плитах. В каждой полости, образованной пластинами, два отверстия ограничены прокладками, а через два других теплоноситель входит в полость. Таким образом, осуществляется раздельное движение двух веществ. Рифленные пластины обеспечивают жесткость и повышают коэффициенты теплоотдачи за счет турбулизации потока. Пластины штампуют из листов нержавеющей стали толщиной  $2 \div 1,5$  мм и затем полируют. Уплотняются пластины с помощью резиновых прокладок. Один из типов расположения прокладок показан на рис. 85, г.

Наряду с разборными пластинчатыми теплообменниками применяют полуразборные и неразборные. Неразборные пластинчатые

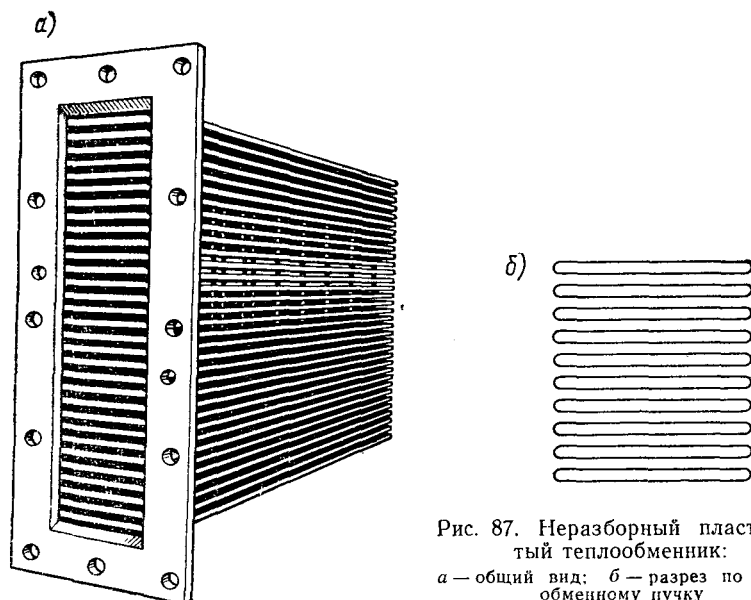


Рис. 87. Неразборный пластинчатый теплообменник:

а — общий вид; б — разрез по теплообменному пучку

теплообменники (ламельные) состоят из пластин, соединенных сваркой, например, по схеме, показанной на рис. 87. По компоновке ламельные теплообменники напоминают кожухотрубные. Некоторое применение находят блочные теплообменники из графита, представляющие собой единый блок, внутри которого во взаимно перпендикулярном направлении по каналам движутся теплоносители.

В теплообменнике, изображенном на рис. 88, по продольным каналам в графитовых блоках 2 движутся корродирующие продукты, а по поперечным — нейтральные вещества. Поперечные каналы накрыты чугунными крышками 4. Блоки по концам закрыты тор-

ются с помощью стяжек 3.

Из графита и графитовых композиций изготавливают пластинчатые теплообменники, состоящие из комплекта склеенных листов [12].

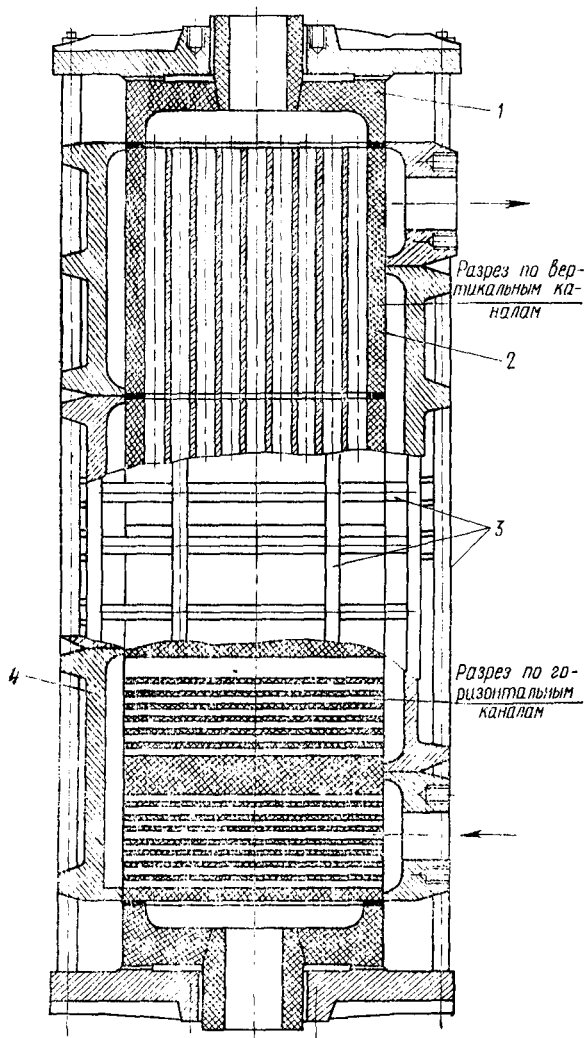


Рис. 88. Блочный графитовый теплообменник

### § 3.5. Теплообменные устройства аппаратов

Многие химические и физико-химические процессы сопровождаются теплообменом, поэтому в аппаратах часто устанавливают теплообменные устройства, которые можно подразделить на встав-

ные теплообменные элементы и устройства для обогрева стенок. В качестве вставных теплообменников применяют U-образные теплообменные элементы, ничем не отличающиеся от трубных пучков U-образных теплообменников, и змеевики. Змеевики изготавливают

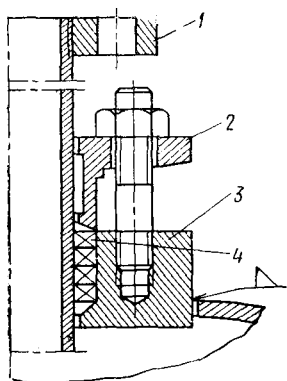


Рис. 89. Вывод змеевика через сальниковое уплотнение:

1 — съемный фланец; 2 — чажимная втулка; 3 — бо- бышка; 4 — набивка

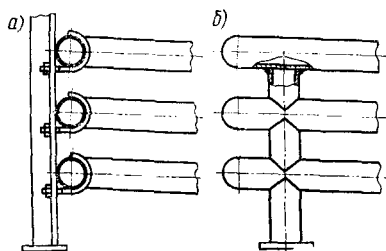


Рис. 90. Способы соединения витков змеевика

обычно в виде цилиндрической спирали, реже — плоской, расположенной на дне сосуда, или петлевых змеевиков. Змеевики обеспечивают значительную поверхность теплообмена, однако затрудняют осмотр, ремонт и очистку аппарата. Применение змеевиков в сосудах с очень вязкими жидкостями или жидкостями, дающими осадки, крайне нежелательно. Вводят (и выводят) теплоагенты в змеевики через крышку аппарата. Наиболее удачная конструкция — сальниковое уплотнение (рис. 89). На трубу, проходящую через сальник, надевается фланец 1 на резьбе. Сняв фланец, можно вынуть трубу, т. е. произвести разборку без применения сварки. Витки змеевика крепятся хомутами к вертикальным стойкам (рис. 90, а) либо свариваются между собой отрезками труб или полосами (рис. 90, б). Когда необходима очень развитая поверхность теплообмена, применяют двух-, трех- и даже четырехрядные змеевики, т. е. несколько спиральных змеевиков, расположенных концентрически. Однако многорядные змеевики создают в аппарате застойные зоны. Змеевики изготавливают из всех теплопроводных материалов: стали, меди, алюминия, титана и свинца, а также стальные эмалированные. Для змеевиков диаметр труб 50÷80 мм, шаг между витками — не менее  $2d$  (при меньшем шаге ухудшается омывание змеевика жидкостью), длина змеевика должна быть не слишком большая, так как при ее чрезмерном увеличении последние витки практически исключаются из процесса теплообмена.

Наряду со змеевиками применяют сварные теплообменные элементы (рис. 91), выполненные из двух коллекторов, соединенных рядом параллельных труб. Их устанавливают как вертикально, так и горизонтально. Иногда используют также элементы в виде двойных теплообменных труб (труб Фильда). Трубы Фильда (рис. 92) сложны по конструкции, так как требуют системы коллекторов для подвода и отвода теплоагента, поэтому их применяют редко, когда другие теплообменные конструкции осуществить не удается.

Обогревают (или охлаждают) поверхность аппарата с помощью рубашек или приварных теплообменных элементов [10]. При теплообмене через стенку поверхность теплопередачи не превышает  $60 \div 70\%$  от наружной поверхности аппарата, поэтому передать значительное количество тепла через рубашку не представляется

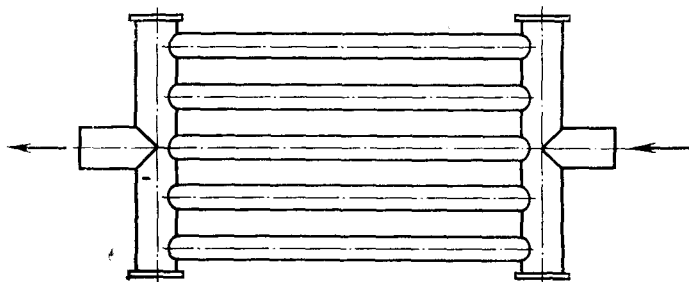


Рис. 91. Сварной теплообменный элемент

возможным. Данные устройства применяют лишь в тех случаях, когда тепловые потоки незначительны. Рубашки приваривают к корпусу аппарата или делают съемными (рис. 93, в), когда приварка их невозможна (например, на аппаратах из чугуна или цветных металлов) или необходимы постоянная очистка и контроль теплообменной поверхности. Приваривают с помощью отбортовки (рис. 93, а) или приварного кольца (рис. 93, б). Приварка с помощью отбортовки более предпочтительна. Зазор между стенками рубашки и корпуса стараются сделать минимальным, чтобы увеличить скорость теплоагента. Диаметр рубашки на  $50 \div 100$  мм больше диаметра аппарата (в аппаратах большой емкости — больше на 200 мм). Обычно рубашку приваривают на  $80 \div 150$  мм ниже соединения крышки с корпусом, а когда коэффициент заполнения аппарата невелик и обогрев верхней незаполненной его части нежелателен, рубашку делают небольшой по высоте. Пар подают в рубашку через верхний штуцер, а конденсат отводят через нижний. Жидкие теплоагенты вводят, как правило, через нижний штуцер, а выводят через верхний.

При увеличении диаметра и давления в рубашке толщина стенки аппарата становится недопустимо большой. Например, при диаметре аппарата 1800 мм и давлении в рубашке  $0,6 \text{ Н/мм}^2$  толщина

стенки корпуса 14÷16 мм из расчета на наружное давление. Чтобы уменьшить расход металла, при повышенном давлении в рубашке целесообразно применять конструкции, в которых стенка укреплена какими-либо элементами жесткости. К таким конструкциям относятся рубашки с «вмятинами» и приварка ребер жесткости на корпусе аппарата. На рубашке с «вмятинами» (рис. 94) делают

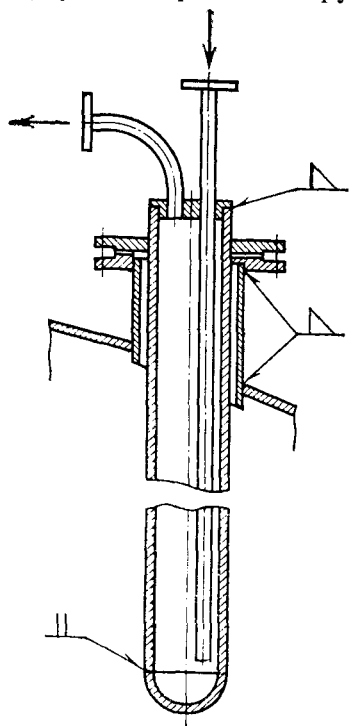


Рис. 92. Двойная теплообменная труба

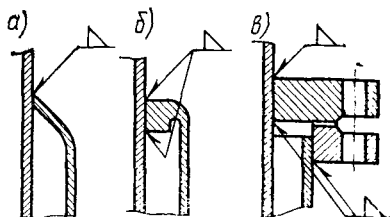


Рис. 93. Способы соединения рубашек с корпусом аппарата

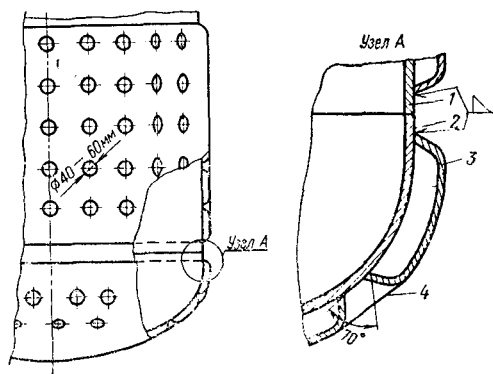


Рис. 94. Рубашка с «вмятинами»: 1 — обечайка; 2 — днище; 3 — рубашка; 4 — отбортованный край

круглые отверстия, края которых отгибают и приваривают к корпусу аппарата, благодаря чему корпус и рубашка 3 образуют жесткую пространственную конструкцию, которая может при сравнительно малой толщине стенки воспринимать значительные давления. Диаметр вмятин 40÷60 мм, шаг между вмятинами 120÷250 мм. Рубашки рассчитаны на давление до 6,4 Н/мм<sup>2</sup>. Иногда вместо отбортовки края отверстия в рубашку вваривают патрубки.

В рубашке с вмятинами толщина стенки аппарата (мм)

$$s_a = 0,15 D p_a / ([\sigma] \varphi) + t \sqrt{p_p / (5 [\sigma] \varphi)} + c + c_1, \quad (67)$$

где  $p_a$  — давление в аппарате, Н/мм<sup>2</sup>;  $p_p$  — давление в рубашке, Н/мм<sup>2</sup>;  $D$  — диаметр аппарата, мм;  $t$  — шаг вмятин, мм.

Толщина стенки рубашки  $s_p = 0,7 s_a$ .

Другой способ обеспечения конструкции — приварка ребер жесткости к корпусу. В первой главе было показано, что приварка ребер к цилиндрической обечайке, нагруженной наружным давлением, существенно уменьшает расход металла. При приварке ребер жесткости на корпус аппарата под рубашку необходимо считаться с тем, что высота ребра ограничена зазором в рубашке. Ребра следует приваривать с таким расчетом, чтобы было наилучшее движение теплоагента в рубашке, т. е. по спирали (рис. 95), подобная

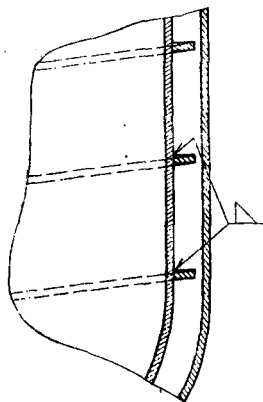


Рис. 95. Установка ребер в пространстве рубашки

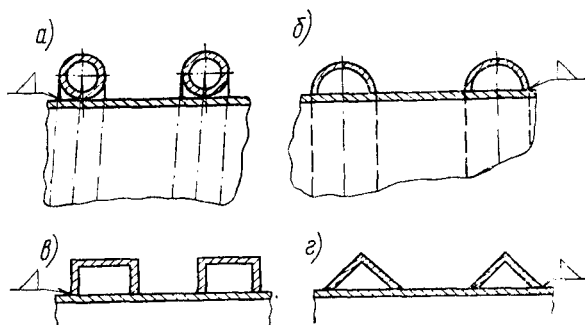


Рис. 96. Приварные теплообменные элементы

приварка кроме обеспечения жесткости стенок еще и способствует значительному повышению коэффициента теплоотдачи от жидких теплоагентов за счет увеличения скорости их движения.

Приварные теплообменные элементы изготовляют из труб (а), полутруб (б) или профильного проката, т. е. швеллеров (в) или уголков (г), показанных на рис. 96. Элементы из профильного проката можно применять только при низком давлении теплоагентов. Минимальное расстояние между приварными элементами определяют из условий удобного доступа к сварному шву. Для лучшей передачи тепла трубы необходимо приваривать двойным сплошным швом. На практике обычно не бывает необходимости устанавливать теплообменные элементы очень близко, так как благодаря хорошей теплопроводности металла участок стенки, прилегающей к приварному элементу, также участвует в теплообмене. Чем больше толщина стенки, тем значительнее тепловой поток, расходящийся по стенке в стороны от приварного элемента. Приварные элементы располагают на поверхности аппарата по-разному: в виде спирали, навитой на цилиндрический корпус аппарата; зигзагообразно по образующей цилиндра; с двумя приварными кольцевыми коллекторами, которые соединяются элементами, расположенными по образующей.

При конструировании рубашек необходимо считаться с температурными напряжениями, которые определяют в рубашках тем же способом, что и в кожухотрубных теплообменниках, и в случае необходимости на рубашку устанавливают компенсатор.

**Пример 5.** Произвести расчет кожухотрубного теплообменника с неподвижными трубными решетками. Длина труб  $l=5$  м; число труб  $n=121$  шт.; диаметр кожуха  $D=400$  мм, размер трубок  $25 \times 2$  (наружный диаметр  $d_b=25$  мм, толщина стенки 2 мм); шаг между трубками  $t=32$  мм; давление в трубном пространстве  $p_t=1,6$  Н/мм<sup>2</sup>, в межтрубном  $p_m=0,6$  Н/мм<sup>2</sup>; температура кожуха  $t_k=90^\circ$  С; трубок  $t_t=150^\circ$  С; толщина кожуха  $s=4$  мм.

Решение. Рассмотрим вопрос о необходимости установки компенсатора. Так как трубки и кожух изготовлены из углеродистой стали, то температурные напряжения

$$Q = \alpha \Delta t / [1/(EF_t) + 1/(EF_k)] = 12 \cdot 10^{-6} (150 - 90) [1/(2 \cdot 10^5 \cdot 17\,100) + 1/(2 \cdot 10^5 \cdot 5070)] = 563\,000 \text{ Н},$$

$$\text{где } F_t = \frac{\pi}{4} (d_b^2 - d_{вн}^2) n = \frac{3,14}{4} (25^2 - 21^2) 121 = 17\,100 \text{ мм}^2; F_k = \pi (D + s) s = 3,14 (400 + 4) 4 = 5070 \text{ мм}^2.$$

Напряжения в корпусе

$$\sigma = 563\,000/5070 = 111,0 \text{ Н/мм}^2.$$

Так как напряжения значительные, устанавливаем один линзовый компенсатор. Принимаем диаметр линзы  $D_b=550$  мм, толщину компенсатора  $s_1=3$  мм. Коэффициент гибкости компенсатора

$$\psi = 0,06\alpha_1 \frac{(1 - \beta) D^2}{(\pi E s_1^3)} = \frac{0,06 \cdot 0,73 (1 - 0,727) 400^2}{(3,14 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3^3)} = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ мм/Н},$$

где  $\beta = D/D_b = 400/550 = 0,727$ .

После установки линзового компенсатора температурные усилия

$$Q = \frac{\alpha \Delta t l}{1/(EF_t) + 1/(EF_k) + \psi z} = \frac{12 \cdot 10^{-6} (150 - 90) 5000}{5000/(2 \cdot 10^5 \cdot 17\,100) + 5000/(2 \cdot 10^5 \cdot 5070) + 1,13 \cdot 10^{-4} \cdot 1} = 30\,300 \text{ Н}.$$

Температурные усилия после установки компенсатора значительно уменьшаются.

Температурное усилие (растягивающее), действующее на одну трубку,  $q_t = Q/n = 30300/121 = 250$  Н.

Определим усилия в трубках за счет давления. Осевое усилие

$$Q = p_m (D_b^2 - n d_n^2) \pi/4 + p_t n d_{вн}^2 \pi/4 = 0,6 (550^2 - 121 \cdot 25^2) \cdot 3,14/4 + (1,6 \cdot 121 \cdot 21^2) 3,14/4 = 293\,900 \text{ Н}.$$

Усилие, приходящееся на одну трубку,  $q_p = 293900/121 = 2430$  Н.

Суммарное усилие на одну трубку  $q = q_p + q_t = 2430 + 250 = 2680$  Н.

Надежность развальцовки  $\sigma = q/(\pi d_b) = 2680/(3,14 \cdot 25) = 34,1$  Н/мм — величина допустимая.

$$s = 0,21D \sqrt{k p_T / ([\sigma] \psi) + c} + c_1 = 0,21 \cdot 400 \sqrt{1,50 \cdot 1,6 / (131 \cdot 0,218)} + 1 + 1 = \\ = 26,4 \text{ мм},$$

$$\text{где } k = 1 + \frac{p_K}{p_T} \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} + \frac{Q_K}{0,785 D^2 p_T} = 1 + \frac{0,6}{1,6} \cdot \frac{(1 - 0,727^2)}{0,727^2} + \\ + \frac{3,2 \cdot 10^5}{0,785 \cdot 400^2 \cdot 1,6} = 1,50; \quad \psi = (t - d)/t = (32 - 25)/32 = 0,218; \quad Q_K = [\alpha_T (t_T - \\ - t_C) - \alpha_K (t_K - t_C)] l / (yz) = [12 \cdot 10^{-6} (150 - 20) - 12 \cdot 10^{-6} (90 - 20)] \times \\ \times 5000 / (1,13 \cdot 10^{-4}) = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Принимаем толщину трубной решетки  $s = 28 \text{ мм}$ .

**Пример 6.** Рассчитать теплообменник с U-образными трубками, если средний диаметр прокладки 1000 мм, давление в трубном пространстве  $p_T = 0,6 \text{ Н/мм}^2$ , в межтрубном пространстве  $p_M = 2,5 \text{ Н/мм}^2$ , температура  $200^\circ \text{С}$ , размер труб  $20 \times 2$ , шаг труб  $t = 26 \text{ мм}$ , материал теплообменника — углеродистая сталь ( $c = 1 \text{ мм}$ ;  $c_1 = 1 \text{ мм}$ ).

**Решение.** При наибольшем давлении в межтрубном пространстве толщину трубной решетки:

$$s = 0,238 D_{с.ш} \sqrt{p / [\sigma] \psi} + c + c_1 = 0,238 \cdot \sqrt{2,5 / (126 \cdot 0,23)} + 1 + 1 = 71,7 \text{ мм}, \\ \text{где } \psi = (t - d)/t = (26 - 20)/26 = 0,23.$$

## ГЛАВА 4

### РЕЗЕРВУАРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЕМКОСТНАЯ АППАРАТУРА

#### § 4.1. Резервуары

В химической и нефтехимической промышленности применяют значительное количество резервуаров для продуктов, весьма различных по своим свойствам: огне- и взрывоопасных, летучих, корродирующих и застывающих жидкостей. Так как с увеличением объема резервуара уменьшается удельный расход металла на единицу объема, стремятся максимально увеличить объем резервуаров.

Резервуары изготовляют цилиндрические (вертикальные и горизонтальные) и шаровые и весьма ограниченно прямоугольные. По способу установки резервуары могут быть наземными, полуподземными и подземными. В химической промышленности применяют в основном наземные.

**Цилиндрические резервуары.** Вертикальные цилиндрические резервуары. Их выполняют емкостью до  $20\,000 \text{ м}^3$  с плоским дном и конической крышей (рис. 97). Обечайка цилиндрического резервуара состоит из нескольких царг (поясов), сваренных внахлестку. Верхний пояс делают из листов наименьшей толщины, а толщину следующих поясов увеличивают книзу по мере возрастания гидростатического давления. Для стальных резервуа-

ров из условий жесткости и надежности сварки толщину стенки принимают не менее 4 мм. Так как расчетная толщина стенки небольших резервуаров (до 1000 м³) не превышает 4 мм, то их делают одинаковой толщины. Толщину дна резервуара принимают такой же, как и толщину нижнего пояса. Крышу резервуара опирают на радиально расположенные балки, которые в центре связаны кольцом. Верхний край обечайки укрепляют кольцом жесткости из уголка. В больших резервуарах (диаметром более 12 м) в центре устанавливают колонну, на которую опираются балки кровли.

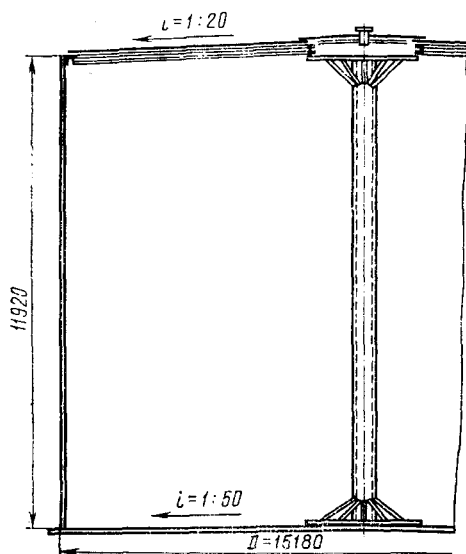


Рис. 97. Вертикальный цилиндрический резервуар с центральной стойкой

Штуцера и люки на крыше резервуара располагают обычно с края и обслуживают со специальной площадки. Хождение по кровле резервуара, как правило, не допускается.

В настоящее время освоен прогрессивный метод сборки вертикальных цилиндрических резервуаров из укрупненных элементов. Боковая стенка поступает в виде рулонной заготовки — цельного сварного полотнища, закрученного в рулон транспортальных размеров, а дна и крышки — в виде секторов и сегментов. На крыше устанавливают штуцера для наполнения, вентиляционный штуцер, световой люк, люк для замера уровня и указатель уровня.

В нижней части резервуара делают люк для обслуживания и спускной штуцер. Иногда заполняют и опорожняют резервуар через один нижний приемо-раздаточный патрубок. Вентиляционный штуцер служит для «дыхания» резервуара, входа и выхода воздуха при измерении уровня жидкости. При работе со взрыво- и пожароопасными жидкостями на вентиляционные штуцеры последовательно устанавливают дыхательный клапан и огнепреградитель. Дыхательный клапан имеет две плоские тарелки, которые поднимаются как при избыточном давлении, так и при вакууме в резервуаре. После выравнивания давления тарелка закрывается и разобщает пространство от внешней среды. Для защиты от примерзания поверхность тарелок покрывают фторопластовой пленкой. Огнепреградитель — коробка, заполненная медными кольцами, комплектом сеток или гофрированными медными или алюминиевыми лентами. Пламя, попавшее в огнепреградитель, гаснет вследствие быстрого охлаждения.

Для перекрытия сливного трубопровода в случае аварии на линии устанавливают хлопушку, которая имеет штуцер с косым срезом, закрытый откидной крышкой. Открывается и закрывается хлопушка с помощью каната. Для подачи пены при тушении пожара устанавливают пеносливную камеру, в которую подают растворы пенообразователей. Камеру устанавливают у боковой стенки резервуара в верхней его части.

При хранении застывающих продуктов устанавливают обогревающие элементы. Для этого на дне резервуара укладывают секционные теплообменники, подобные показанному на рис. 91. Иногда вставляют U-образные элементы или обогревают стенки хранилища.

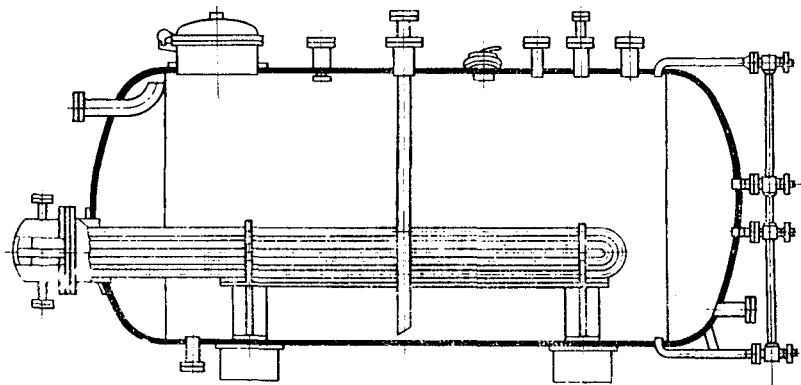


Рис. 98. Горизонтальный цилиндрический резервуар с U-образным греющим элементом

Горизонтальные цилиндрические резервуары (рис. 98). Их изготовляют объемом до  $150 \div 200 \text{ м}^3$ , длиной до 20 м. Наиболее рационально отношение длины к диаметру  $D/L=6$ .

Горизонтальные цилиндрические резервуары выполняют с плоскими, тарельчатыми, полусферовыми и эллиптическими днищами. Плоские и тарельчатые днища применяют при давлении в резервуаре до  $0,04 \text{ Н/мм}^2$ , при более высоком устанавливают полусферовые или эллиптические днища. На стальные, стальные гуммированные и алюминиевые горизонтальные резервуары емкостью до  $100 \text{ м}^3$  составлены каталоги, по которым их изготовляют на заводах химического машиностроения. По соображениям габаритности, чтобы обеспечить беспрепятственный провоз по железной дороге, каталожные резервуары делают диаметром не более 3200 мм. Горизонтальные резервуары целесообразно устанавливать на двух опорах, иначе трудно обеспечить равномерное опирание на все точки. Однако крупные резервуары устанавливают на трех, четырех или даже пяти опорах. При устройстве фундаментов под резервуары, имеющие три, четыре или пять опор, принимают специальные меры, обеспечивающие равномерную нагрузку на все точки, для чего, например, при бетонировании под опору подают жидкий бетон под

давлением. Опоры под горизонтальные резервуары делают стальными, приваренными к корпусу аппарата, или в виде бетонных тумб с седловиной. Предпочтительны стальные опоры, которые состоят из горизонтального листа (подошвы) и вертикальных ребер, связывающих его с корпусом аппарата. Угол обхвата аппарата стальной или бетонной опорой не менее  $120^\circ$ . На аппаратах, подверженных значительным температурным колебаниям, одну опору делают жестко закрепленной, а другие — подвижными, установленными на ролики.

Горизонтальные резервуары больших размеров укрепляют кольцами жесткости, расположенными над опорами внутри аппарата (если это возможно) или снаружи. При внутреннем расположении их иногда укрепляют распорками в форме треугольника.

Опорожняют резервуары через штуцер нижнего спуска, передавливанием или с помощью погружных насосов. Такой насос имеет длинный вертикальный вал. Сверху, над крышкой резервуара, расположен электродвигатель, на нижнем конце вала установлено рабочее колесо насоса. Всасывающий патрубок опущен вниз, расстояние его от дна аппарата  $40 \div 60$  мм. Глубина погружения насоса до 3 м. Погружные насосы применяют в тех случаях, когда устройство нижнего спуска нежелательно из-за свойств продукта и когда резервуар зарыт на определенную глубину в землю или стоит на нулевой отметке и установка центробежного насоса ниже дна резервуара представляет трудности.

Обогревают горизонтальные резервуары с помощью вставных U-образных элементов, как показано на рисунке, или змеевиков, приваренных к наружной стенке.

**Шаровые резервуары.** Применяют для хранения под давлением легколетучих жидкостей или сжиженных газов (рис. 99), изготовляют из штампованных элементов. Они опираются на нижние опоры и стойки, расположенные по экватору. Обслуживание арматуры, установленной в верхней части резервуара, производят с площадки. В настоящее время изготовляют шаровые резервуары диаметром до 20 м на рабочее давление до  $3,0 \text{ Н/мм}^2$ .

**Прямоугольные резервуары.** Они просты в изготовлении и позволяют наилучшим образом использовать площадь помещения, в котором они установлены, однако расход металла на единицу объема у них в  $3 \div 4$  раза больше, чем у цилиндрических, вследствие значительных изгибающих напряжений, возникающих в плоских стенках. Поэтому прямоугольные резервуары большой емкости применять нецелесообразно. Такие резервуары (коробки) используют для хранения небольших объемов жидкости и в качестве корпусов погруженных холодильников, кожухов сушилок и для других вспомогательных целей. Грани прямоугольных резервуаров связывают уголками для повышения жесткости конструкции. При значительных размерах коробки устанавливают также горизонтальные и вертикальные ребра жесткости на боковых стенках. По возможности прямоугольные резервуары больших размеров снабжают внутренними связями из проката или стержней со стяжными гайками.

Резервуары, защищенные антикоррозионными покрытиями, имеют ряд конструктивных особенностей: корпуса футерованных резервуаров делают сваренными встык и толщины стенок увеличивают для придания им жесткости. Плоские днища больших резервуаров укрепляют балками. Резервуары обычно футеруют кислотоупорным кирпичом по непроницаемому подслою. Для удобства футеровки в нижней части делают люк большого диаметра (не ме-

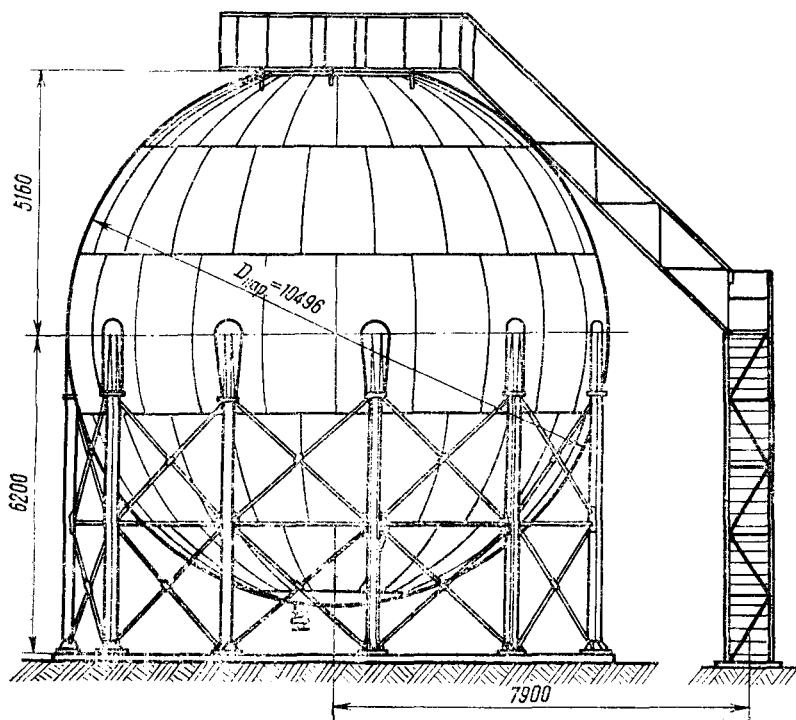


Рис. 99. Шаровой резервуар емкостью 600 м³

нее 800 мм), который закладывают кирпичом после выполнения работ. Крышу резервуара защищают каким-либо лакокрасочным покрытием, причем для удобства защиты опорные балки целесообразно выносить на наружную поверхность кровли. Так как лакокрасочное покрытие не гарантирует достаточно надежной защиты поверхности, хождение по крыше футерованных резервуаров категорически исключается. В случае необходимости обслуживания центральной части крыши хранилища над ней делают переходной мостик. Футерованные резервуары устанавливают не на сплошное основание, а на ленточные фундаменты или балки, чтобы иметь доступ к днищу для его осмотра.

## § 4.2. Вспомогательная емкостная аппаратура

Наряду с резервуарами, предназначенными для больших объемов жидкости, в химической и нефтехимической промышленности применяют значительное количество вспомогательной емкостной аппаратуры: небольших буферных (промежуточных) емкостей, напорных баков, мерников, флорентийских сосудов, фазоразделителей и др.

Напорные баки служат для поддержания постоянного напора жидкости. Мерники емкостью не более  $2 \div 2,5 \text{ м}^3$  применяют большей частью в периодических процессах для отмеривания заданного объема жидкости. Отмеривание производится по изменению уровня жидкости, для чего мерники снабжают поплавковым уровнем или мерным стеклом. Для точного определения измеряемого объема мерники имеют отношение высоты к диаметру большее, чем у обычных емкостных аппаратов. Мерники и напорные баки кроме патрубков наполнения и слива имеют обычно переливные линии на случай переполнения аппарата и воздушники.

Флорентийские (разделительные) сосуды служат для разделения двух несмешивающихся жидкостей. После расслаивания через нижний штуцер сливается более тяжелая жидкость, а через боковые штуцера — легкая. Фазоразделители используют для разделения жидкой и газовой фаз. Они представляют собой небольшие емкостные аппараты, в которых газожидкостная смесь расслаивается, что дает возможность разделить ее на два потока.

## § 4.3. Расчет резервуаров на прочность

С учетом прочности сварного шва и прибавки на коррозию толщина стенки каждого пояса вертикального цилиндрического резервуара

$$s = [p_{изб} + H\gamma] D / (2[\sigma]\varphi) + c + c_1, \quad (68)$$

где  $p_{изб}$  — избыточное давление, Н/мм<sup>2</sup>;  $H$  — высота слоя жидкости от нижней точки пояса до верха резервуара; мм;  $\gamma$  — удельный вес жидкости, Н/мм<sup>3</sup>;  $[\sigma] = 160 \text{ Н/мм}^2$  — допускаемое напряжение для Ст3;  $\varphi$  — коэффициент прочности сварного шва;  $c$  — прибавка на коррозию, мм.

Гидростатическое давление в нижней точке сферического резервуара  $p = p_{изб} + \gamma D$ , где  $D$  — диаметр аппарата.

Расчет производят по нормам и правилам для аппаратов под давлением.

Толщина вертикальной стенки прямоугольного резервуара

$$s = a \sqrt{k\gamma H / (2[\sigma])} + c, \quad (69)$$

где  $a$  — короткая сторона стенки (высота или длина в зависимости от конструкции), мм;  $k = 0,7 / [1 + 1,61 (a/b)^2]$ ;  $k$  — коэффициент, зависящий от отношения  $a/b$  (где  $b$  — длинная сторона стенки);  $H$  — высота аппарата, мм.

Если резервуар имеет вертикальные ребра жесткости, то за ширину принимают расстояние между ребрами 800÷1000 мм.

Если толщина стенки выбрана предварительно, то минимальное расстояние между стойками

$$L = (s - c) \sqrt{[\sigma] k / (2\gamma H)}. \quad (70)$$

Ребра жесткости рассчитывают на изгиб. Изгибающий момент

$$M = \gamma L H^3 / 16. \quad (71)$$

Момент сопротивления ребра  $\omega = M / [\sigma]$ .

Когда резервуары с плоским дном устанавливают на балки, минимальное расстояние между балками определяют, рассчитывая дно на изгиб как многопролетную балку. Нагрузка, приходящаяся на полосу дна шириной 1 мм и длиной  $l$ , равной расстоянию между балками, будет

$$P = H \gamma l. \quad (72)$$

Максимальный изгибающий момент в этой полоске

$$M = Pl / 12. \quad (73)$$

Момент сопротивления полосы изгибу  $\omega = (s - c)^2 / 6$ . Напряжение в дне  $\sigma = M / \omega$ .

Из последнего равенства при заданной толщине стенки находят максимально допустимое расстояние между опорными балками:

$$l = 1,41 (s - c) \sqrt{[\sigma] (\gamma H)}. \quad (74)$$

Днища аппаратов, установленные на сплошное основание, нет необходимости рассчитывать на изгиб. Горизонтальные цилиндрические резервуары испытывают действие внутреннего давления и весовых нагрузок. Корпус резервуара необходимо также проверять на устойчивость при изгибе и на местную устойчивость в местах установки опор. Напряжения от действия внутреннего давления рассчитывают по (10), причем в расчет принимают суммарное гидростатическое и избыточное газовое давление.

При расчете горизонтальных резервуаров на изгиб резервуар рассматривают как балку, лежащую на опорах и нагруженную равномерно распределенной нагрузкой  $q = G/L$ , где  $G$  — вес аппарата вместе с содержимым;  $L$  — длина аппарата.

Если длина аппарата достаточно велика по сравнению с диаметром, то в качестве  $L$  с достаточной степенью точности принимают действительную длину аппарата. При уточненном расчете приведенная длина аппарата\*:

$$L = L + 2L_{\text{д}}, \quad (75)$$

---

\* Во всех приведенных формулах размерности удельного веса и остальных величин должны быть в одинаковых единицах.

где  $L_{\text{ц}} = (G_1 + G_2) / (\pi D^2 \gamma_{\text{ж}} / 4 + \pi D s \gamma_{\text{м}})$  — длина выпуклого днища, приведенная к цилиндрической оболочке (знаменатель представляет собой вес одного погонного метра резервуара);  $G_1$  — вес днища;  $G_2$  — вес жидкости в объеме днища;  $\gamma_{\text{ж}}$  — удельный вес жидкости;  $s$  — толщина стенки цилиндрической оболочки;  $\gamma_{\text{м}}$  — удельный вес металла.

В середине резервуара изгибающий момент (рис. 100)

$$M_1 = G(L - 4a) / 8, \quad (76)$$

где  $a$  — длина концов аппарата, консольно выступающих за опоры.

Изгибающий момент над опорой

$$M_2 = qa^2 / 2. \quad (77)$$

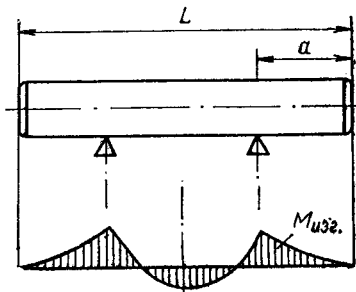


Рис. 100. К расчету горизонтального резервуара на изгиб

Соответствующее равенству моментов  $M_1 = M_2$  оптимальное расстояние между опорами  $l = 0,586L$ . При этом условии будет наименьшим изгибающий момент

$$M_{\text{изг}} = GL / 47. \quad (78)$$

Резервуары на трех, четырех и большем числе опор рассчитывают как многоопорные неразрезные балки.

После определения моментов  $M_1$  и  $M_2$  проверяют прочность стенки при совместном действии изгиба и давления. В обечайке резервуара меридиональные напряжения

$$\sigma_{\text{м}1} = pD / [4(s - c)] \pm 1,275M_1 / [D^2(s - c)], \quad (79)$$

$$\sigma_{\text{м}2} = pD / [4(s - c)] \pm 1,275M_2 / [k_1 D^2(s - c)]. \quad (80)$$

Если составляющие напряжения от давления и веса имеют разные знаки, то должны выполняться условия устойчивости:

$$pD / [4(c - s)] - 1,275M_1 / [D^2(s - c)] \leq 0,1E(s - c) / D; \quad (81)$$

$$pD / [4(s - c)] - 1,275M_2 / [k_1 D^2(s - c)] \leq 0,1E(s - c) / D. \quad (82)$$

Здесь коэффициент  $k_1$  учитывает эффективную площадь обечайки в сечении над опорой. При установке над опорой кольца жесткости  $k_1 = 1$ . Когда укрепляющие элементы отсутствуют, значение  $k_1$  определяют по графику, изображенному на рис. 101, в зависимости от угла охвата опоры  $\alpha$ .

При отношении  $D / (s - c) \geq 300$  или когда резервуар работает под вакуумом, необходимо проверять обечайку на местную устойчивость. В корпусе горизонтального резервуара наряду с меридиональными напряжениями действуют кольцевые.

На рис. 102 показана эпюра распределения кольцевых изгибающих моментов, которые стремятся деформировать круглую оболочку и придать ей форму эллипса.

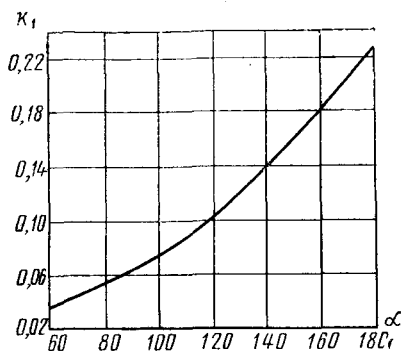


Рис. 101. График коэффициента  $k_1$

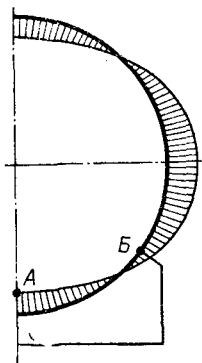


Рис. 102. Эпюра кольцевых изгибающих напряжений

Расчет кольцевых напряжений производят по следующим формулам: для нижней точки опоры  $A$   $\sigma_k = k_2 Q / [2(s-c)l_{эф}]$ ; для крайней точки опоры  $B$  при  $L/D \geq 4$

$$\sigma_k = \frac{Q}{(s-c)^2} \left[ \frac{(s-c)}{4l_{эф}} + 1,5k_3 \right] \quad (83)$$

при  $L/D \leq 4$

$$\sigma_k = \frac{Q}{(s-c)^2} \left( \frac{s-c}{4l_{эф}} + 6k_3 \frac{L}{D} \right), \quad (84)$$

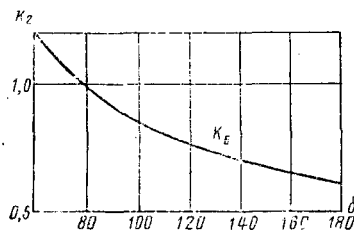


Рис. 103. График коэффициента  $k_2$

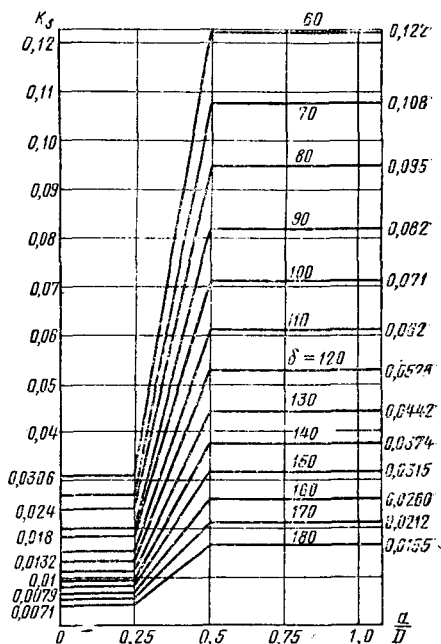


Рис. 104. График коэффициента  $k_3$

где  $k_2, k_3$  — коэффициенты, определяемые по графикам, данным на рис. 103 и 104, в зависимости от угла обхвата емкости опорой;  $l_{эф} = b + 1,1 \sqrt{D(s-c)}$  или  $l_{эф} = b + 30(s-c)$  — эффективная длина

обечайки (из двух значений принимают наименьшее);  $b$  — ширина опоры, если между опорой и корпусом резервуара находится подкладной лист, то (83) и (84) подставляют вместо  $s$  суммарную толщину обечайки и подкладного листа (но не более  $2s$ ). В конце расчета проверяют условия прочности:  $\sigma_{m1} \leq \varphi[\sigma]$ ;  $\sigma_{m2} \leq \varphi[\sigma]$ ;  $\sigma_k \leq \varphi[\sigma]$ .

**Пример 7.** Рассчитать вертикальный цилиндрический резервуар диаметром  $D=5$  м и высотой  $H=5,5$  м, заполненный жидкостью с удельным весом  $\gamma = 12500$  Н/м<sup>3</sup>  $= 12,5 \cdot 10^{-6}$  Н/мм<sup>3</sup>. Резервуар сделан из Ст 3, допускаемое напряжение которого  $[\sigma] = 160$  Н/мм<sup>2</sup>. Прибавка на коррозию  $c=2$  мм. Избыточное давление над поверхностью жидкости  $p_{изб} = 0,005$  Н/мм<sup>2</sup>. Коэффициент прочности сварного шва  $\varphi = 0,8$ .

**Решение.** У основания резервуара толщина боковой стенки

$$s = (p_{изб} + H\gamma) D / (2[\sigma]\varphi) + c = (0,005 + 5500 \cdot 12,5 \cdot 10^{-6}) 5000 / (2 \cdot 1600 \cdot 0,8) + 2 = 3,49 \text{ мм.}$$

Принимаем  $s=4$  мм.

**Пример 8.** Рассчитать горизонтальный цилиндрический резервуар из углеродистой стали Ст3 емкостью 25 м<sup>3</sup>, опирающийся на две опоры. Диаметр резервуара 2400 мм, длина 6150 мм, длина цилиндрической части 5400 мм, удельный вес жидкости 12500 Н/м<sup>3</sup>, хранилище работает под избыточным давлением 0,6 Н/мм<sup>2</sup>, при температуре 20—60°С. Ширина опоры  $b=600$  мм, угол обхвата 120°. Толщина стенки, определенная из расчета действия внутреннего давления по (10), равна 7 мм, коэффициент прочности сварного шва принят  $\varphi=0,9$ ; прибавка на коррозию 1 мм.

Принимаем предварительно толщину стенки 8 мм. Вес резервуара по предварительному подсчету равен 10 000 Н.

**Решение.** Максимальный вес резервуара с жидкостью  $Q = 10\,000 + 25 \times 12\,500 = 412\,500$  Н.

Приведенная длина резервуара, определенная по (75),  $L_{пр} = 5600$  мм.

Вес одного миллиметра резервуара  $q = Q/L_{пр} = 412\,500/5600 = 76$  Н/мм.

Расстояние между опорами принимаем 3200 мм.

В середине резервуара изгибающий момент  $M_1 = Q(L-4a)/8 = 412\,500(5600 - 4 \cdot 1200)/8 = 41,25 \cdot 10^6$  Н·мм.

Изгибающий момент над опорой  $M_2 = qa^2/2 = 76 \cdot 1200^2/2 = 54,7 \cdot 10^6$  Н·мм.

Меридиональные напряжения в середине резервуара

$$\sigma_{m1} = pD/[4(s-c)] + 1,275M_1/[D^2(s-c)] = 0,6 \cdot 2400/[4(8-1)] + 1,275 \cdot 41,25 \cdot 10^6/[2400^2(8-1)] = 52,0 \text{ Н/мм}^2;$$

над опорой,

$$\sigma_{m2} = pD/[4(s-c)] + 1,275M_2/[k_1D^2(s-c)] = 0,6 \cdot 2400/[4(8-1)] + 1,275 \cdot 54,7 \cdot 10^6/[0,103 \cdot 2400^2 \cdot (8-1)] = 64,0 \text{ Н/мм}^2,$$

где  $k_1$  — коэффициент, определенный по графику, данному на рис. 101 для опоры с углом обхвата 120°.

Кольцевые напряжения у края опоры (точка Б на рис. 102)

$$\sigma_{k1} = k_2Q/[2(s-c)I_{\phi}] = 0,75 \cdot 412\,500/[2(8-1)810] = 37,2 \text{ Н/мм}^2;$$

в середине опоры (точка А на рис. 102)

$$\sigma_{k2} = \frac{Q}{(s-c)^2} \left[ \frac{s-c}{4I_{\phi}} + 6k_3 \frac{D}{L} \right] = \frac{412\,500}{(8-1)^2} \left[ \frac{8-1}{4 \cdot 810} + 6 \cdot 0,0528 \frac{2400}{5600} \right] = 115 \text{ Н/мм}^2,$$

где  $I_{\phi} = b + 30(s-c) = 600 + 30 \cdot 7 = 810$  мм;  $k_2$  и  $k_3$  — коэффициенты, определяемые по графикам, изображенным на рис. 103 и 104.

Величина напряжения значительная. Устанавливаем подкладки толщиной 8 мм. После установки подкладок расчетная толщина  $s=8+8=16$  мм, тогда  $\sigma_{к2}=412\,500/(16-1)^2 [(16-1)/(4\cdot 810)+6\cdot 0,0528\cdot 2400/5600]=33$  Н/мм<sup>2</sup>. Условия прочности удовлетворяются.

## ГЛАВА 5

### АППАРАТЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

#### § 5.1. Устройство и изготовление корпусов аппаратов

К аппаратам высокого давления условно относят аппаратуру, работающую под давлением свыше 10 Н/мм<sup>2</sup>. Эти аппараты применяют в производствах синтетического аммиака, мочевины, метанола, полиэтилена, высших спиртов, некоторых процессов гидрирования и др. Наиболее распространены в данных производствах рабочие давления порядка 30—60 Н/мм<sup>2</sup>. Проектирование и изготовление аппаратов высокого давления — дело весьма ответственное, так как они работают с ядовитыми или взрывоопасными веществами и наряду с опасностью, которую представляет собой высокое давление, появляются трудности работы с ядовитыми и взрывоопасными продуктами. Высокое давление предопределяет форму аппаратов: аппараты изготовляют малых диаметров, чтобы уменьшить толщину стенки и периметр уплотнения, технологический объем аппарата увеличивают за счет его большой длины, поэтому аппараты высокого давления имеют вид колонны длиной  $20\div 25$  м и диаметром  $1400\div 1600$  мм. Колонны высокого давления обычно состоят из двух самостоятельных конструктивных элементов, корпуса с крышкой и насадки («начинки»). Корпус — это оболочка колонны. Его назначение — выдерживать высокое давление, при котором работает аппарат. Насадка несет на себе технологическую нагрузку, имеет теплообменные и газораспределительные элементы, катализаторные коробки и другие внутренние устройства, зависящие от технологического назначения аппарата. Насадку изготовляют в виде цельного блока, что позволяет целиком вынимать ее из корпуса.

Корпуса аппаратов высокого давления в настоящее время унифицированы. Это дает возможность в одном и том же корпусе собирать насадки различного назначения. Так как аппараты высокого давления обычно работают и при высоких температурах, то одной из их конструктивных особенностей являются устройства для защиты стенки корпуса от действия температуры. Один из способов такой защиты — подача холодных компонентов, участвующих в процессе, в кольцевое пространство между корпусом и насадкой.

Основные типы корпусов сосудов высокого давления показаны на рис. 105. Кованые корпуса изготовлялись ранее с двумя съемными крышками на концах (тип I), что определялось технологией их изготовления, в настоящее время более распространен тип II с нижней приварной крышкой. Если необходим доступ к нижней части насадки в аппарате, то делают лаз малого диаметра в нижней час-

ти колонны. Аппараты без сменных внутренних частей или с насадкой малого диаметра делают с одним лазом (тип III).

По способу изготовления сосуды высокого давления подразделяют на сплошные (цельнокованные, кованосварные и штампованные) и составные (многослойные, витые и рулонные).

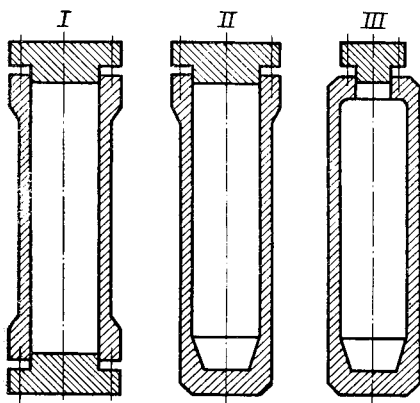


Рис. 105. Основные типы корпусов сосудов высокого давления

Цельнокованные корпуса требуют для своего изготовления тяжелого ковочного оборудования. Применение сварки позволило упростить технологию изготовления сплошных корпусов — их изготавливают кованосварными и штампованными. Кованосварные корпуса состоят из нескольких кованых царг длиной  $3 \div 4$  м, сваренных встык. Нижнее днище и верхнюю концевую часть корпуса отковывают отдельно и приваривают к цилиндрической обечайке. Штампованные корпуса изготавливают из штампованных полукопыт. На рис. 106 показан кованосварной корпус с крышкой. Кованые корпуса выполняют из цельной стальной отливки, в середине которой высверливают отверстие. Потом заготовку надевают на оправку и тщательно проковывают, после чего механически обрабатывают.

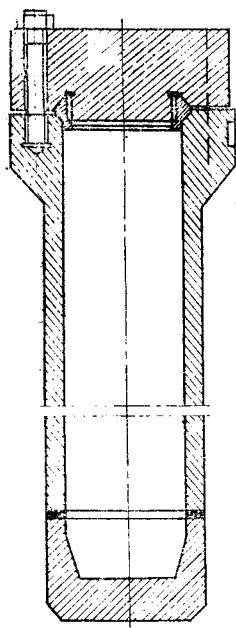


Рис. 106. Кованосварная колонна с крышкой

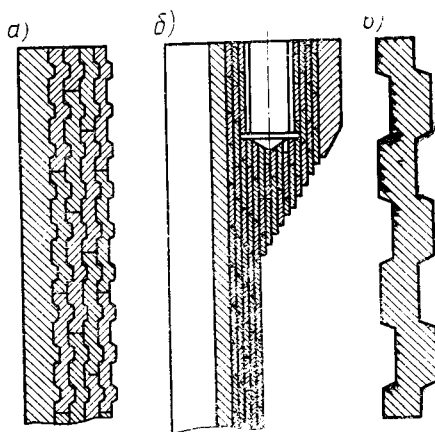
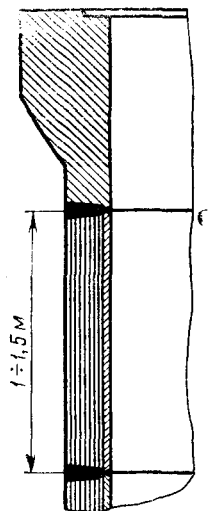


Рис. 107. Узлы витого корпуса (а, б) и профиль стальной ленты для навивки (в)

Многослойные корпуса состоят из нескольких обечаек, насаженных друг на друга с натягом. Данный метод применяют в настоящее время для изготовления лабораторных аппаратов, рассчитанных на высокие и сверхвысокие давления. Оплетенные (витые) сосуды (рис. 107) состоят из центральной гильзы, на которую в несколько слоев наматывают стальную ленту специального профиля в горячем виде. При остывании она сжимает внутреннюю гильзу, что создает более благоприятное распределение напряжения по толщине стенки.



Уступы на ленте обеспечивают сцепление между соседними витками и передачу лентой осевых усилий. Рулонные корпуса состоят из внутренней обечайки толщиной 10 мм, на которую наматывают с натягом ленту толщиной  $3 \div 4$  мм. Торцы рулонных обечаек длиной  $1 \div 1,5$  м обрабатывают по концам и сваривают встык, затем к ним приваривают днище и фланцевое соединение (рис. 108).

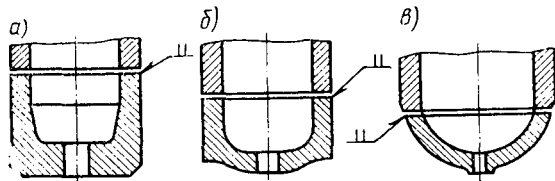


Рис. 108. Узел многослойного корпуса

Рис. 109. Приварные днища колонн высокого давления

Днища сосудов высокого давления показаны на рис. 109. Их изготавливают плоскими (а), имеющими прямоугольное сечение, со сферическим углублением (б) или выпуклыми (в). Крышки аппаратов высокого давления выполняют в виде плоских массивных плит. Присоединяют трубопроводы и контрольно-измерительные приборы к аппаратам высокого давления через отверстия в крышке и днищах. Ослаблять отверстиями корпус колонны не рекомендуется. Штуцеров и бобышек на аппаратах высокого давления не применяют. Вместо них на крышке аппарата обрабатывают кольцевую привалочную поверхность под прокладку и высверливают отверстия под шпильки.

В аппараты высокого давления часто приходится вводить электрический ток. Наиболее распространенный электроввод, показанный на рис. 110, состоит из стального стержня с коническим концом, который изолирован слоем слюды или асбестовой оплеткой. Соединение является самоуплотняющимся: при повышении давления в аппарате стержень сильнее вдавливается в свое гнездо.

В условиях высокого давления и повышенных температур необходимо считаться с действием водородной коррозии, азотирования стали и карбонильной коррозии (в производстве метанола). Водородная коррозия происходит при диффузии водорода в материал корпуса; затем водород вступает в реакцию с карбидами железа и образует метан. Разрушающее действие водорода наблюдается уже при 200° С. Эффективный способ предотвращения водородной коррозии — добавление в сталь хрома, молибдена, ванадия или титана, способных образовывать карбиды, более стойкие, чем карбиды железа. Азотирование наблюдается в аппаратах производства аммиака при температурах стенки свыше 350° С. Азотированный слой у углеродистых и слаболегированных сталей достигает значительной толщины, хрупок, имеет трещины. У аустенитных сталей типа X18H10T; X23H18 азотированный слой более плотный и не имеет трещин. Карбонильная коррозия заключается в том, что окись углерода адсорбируется на поверхности стали и вступает в реакцию с железом, в результате чего уменьшается толщина стенки. Стойки против карбонильной коррозии аустенитные стали типа X18H10T и марганцовистая бронза.

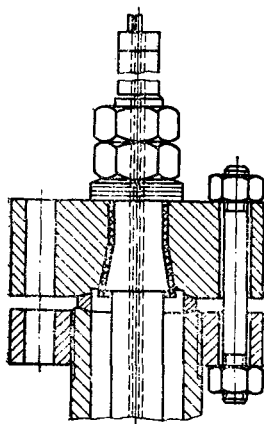


Рис. 110. Электроввод в аппарат высокого давления

В зависимости от температуры корпуса аппараты высокого давления условно подразделяют на «холодные» (при температуре стенки до 200° С) и «горячие» (при температуре стенки от 200° С и выше). Для «холодных» аппаратов применяют углеродистые или слаболегированные стали 35Г2; 09Г2С; 22Х3М, для «горячих» — стали, легированные хромом, никелем, молибденом, вольфрамом, — 25Х3НМ; 20Х2МА и др.

## § 5.2. Затворы и уплотнения аппаратов высокого давления

Уплотнения крышек и штуцеров аппаратов высокого давления должны быть абсолютно надежны в работе и обеспечивать герметичность соединения в условиях высоких давлений и значительных колебаний температуры, просты в изготовлении и удобны для сборки и разборки.

Разъемные соединения аппаратов высокого давления имеют ряд конструктивных особенностей. Для обеспечения герметичности соединения требуется большое удельное давление на прокладку, поэтому для прокладок применяют материалы повышенной прочности, обычно мягкие металлы: медь, алюминий, мягкое железо. Прокладки аппаратов высокого давления и другие сменные элементы затворов называют обтюраторами. В аппаратах высокого давления желательно не применять крепежные детали, нагруженные осевым

усилием, так как при этом диаметры болтов и шпилек получают очень большими и разборка соединений представляет значительные трудности. По источнику силы затяга различают затворы с принудительным уплотнением (за счет усилия, развиваемого болтами) и самоуплотняющиеся (за счет давления среды внутри аппарата). При сверхвысоких давлениях (свыше  $100 \text{ Н/мм}^2$ ) рекомендуется применять только самоуплотняющиеся соединения.

В зависимости от типа применяемых обтюраторов различают уплотнения с их пластической деформацией и уплотнения с жесткими элементами, подвергающимися только упругой деформации. Форма обтюраторов и конструкции узлов уплотнения в аппаратах

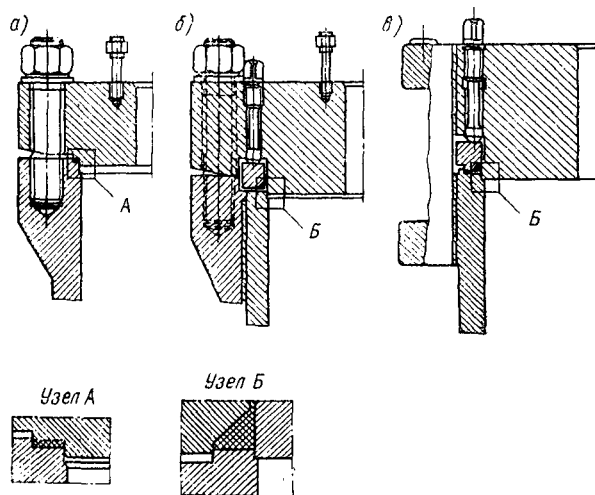


Рис. 111. Затворы с принудительным уплотнением

высокого давления обычно отличаются от соответствующих узлов низкого давления. Обтюраторы, работающие с пластической деформацией, должны находиться в замкнутом пространстве (иначе обтюратор будет растекаться), кроме того, конструкция уплотнения должна обеспечивать сравнительно легкую его замену. В соединении «шип-паз» такая замена затруднительна. Уплотнения с плоским обтюратором и соединением «в замок» наиболее просты и рекомендуются к применению для диаметров до  $600 \text{ мм}$  и давления менее  $32 \text{ Н/мм}^2$ . Уплотнение с треугольным обтюратором более сложно, но имеет широкие пределы применения.

В затворе с плоским обтюратором (рис. 111, а) осевое усилие создается с помощью шпилек. При треугольном обтюраторе (рис. 111, б) осевое усилие воспринимается основными крепежными шпильками. Усилие же нажатия на прижимное кольцо, которое обеспечивает деформацию прокладки и уплотнение соединения, регулируется специальными шпильками. В затворе с разъемной муфтой (рис. 111, в) уплотнение осуществляется с помощью тре-

угольной прокладки и дополнительного прижимного кольца, крепежные шпильки в нем отсутствуют. Осевое усилие воспринимает муфта, связанная с корпусом и крышкой с помощью упорной резьбы. Муфта состоит из двух частей, стянутых кольцами, после снятия которых муфта сравнительно легко разъединяется и соединение может быть разобрано. Чтобы увеличить удельное давление, ширину обтюратора стремятся сделать наименьшей, но она не должна быть менее чем  $b \geq 0,25 D_{\text{вн}} / ([\sigma]_{\text{к}} - q - 0,25 p)$ , где  $D_{\text{вн}}$  — внутренний диаметр кольца обтюратора;  $[\sigma]_{\text{к}}$  — допускаемое контактное напряжение на уплотнительных поверхностях корпуса и крышки: при расчетной температуре. Для сталей с пределом текучести более

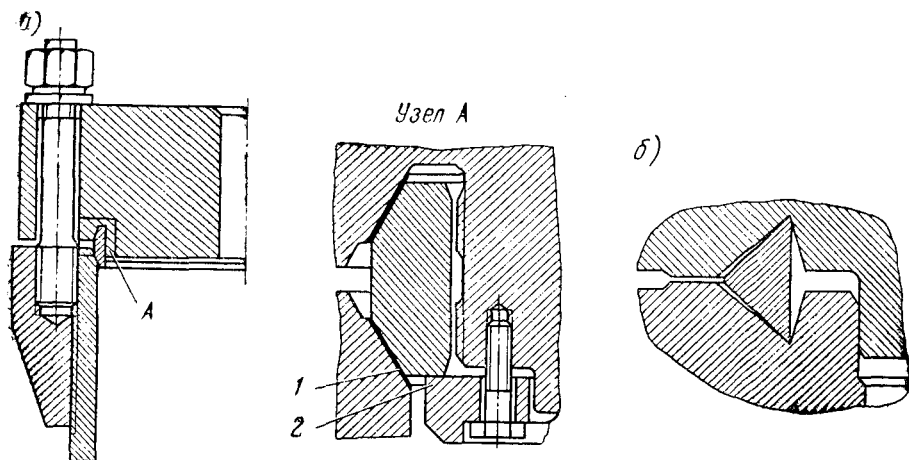


Рис. 112. Самоуплотняющиеся затворы:  
1 — листовой алюминий; 2 — поддерживающее кольцо

$280 \text{ Н/мм}^2$   $[\sigma]_{\text{к}} = 0,75 \sigma_{\text{т}}$ , а с пределом текучести менее  $280 \text{ Н/мм}^2$   $[\sigma]_{\text{к}} = \sigma_{\text{т}}$ .

Из различных типов самоуплотняющихся соединений широкое распространение получил затвор с двухконусным обтюратором (рис. 112, а). Стальной обтюратор зажимается между крышкой и корпусом. Уплотняющим материалом служат прокладки из меди или алюминия толщиной  $1 \div 1,5 \text{ мм}$ . Соединение предварительно затягивают основными крепежными шпильками. Давление в аппарате действует на внутреннюю поверхность кольца, вызывает его упругую деформацию и прижимает к уплотняющим поверхностям.

Аналогичную конструкцию имеет и работающий по принципу упругой деформации затвор с дельтаобразным обтюратором (рис. 112, б).

Для аппаратов небольшого диаметра (до  $300 \text{ мм}$ ) и трубопроводов высокого давления применяют линзовые соединения и соединение с овальными металлическими прокладками.

Крепежными деталями в колоннах высокого давления служат только шпильки. Это весьма ответственные детали и при их изго-

товлении используют все конструктивные меры для разгрузки от всяких дополнительных силовых воздействий. Цилиндрическая часть шпильки, заключенная между резьбами, обтачивается до внутреннего диаметра резьбы, что снижает концентрацию напряжений в шпильке у концов резьбы. Конец шпильки, ввертываемый в корпус, обрабатывают на конус, который упирается в такую же коническую поверхность отверстия под шпильку в корпусе. Для того чтобы можно было подать консистентную смазку к нарезанной части шпильки, в ней высверливают отверстие. Смазка позволяет уменьшить напряжения кручения, возникающие в шпильке при ее затягивании.

Для разгрузки шпилек от изгиба опорные поверхности гаек обрабатывают на сферу и опирают их на сферические шайбы (рис. 113). Высота гаек не меньше диаметра резьбы. Шпильки изготовляют из легированных сталей 30ХМА, 25Х1МФ, а гайки — из менее прочных материалов — углеродистых сталей 25 и 35 или легированных сталей 30Х, 40Х.

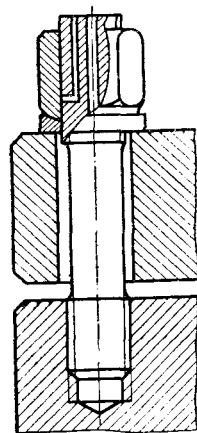


Рис. 113. Общий вид резьбового соединения

### § 5.3. Расчет аппаратов высокого давления

Расчет на прочность сосудов и аппаратов высокого давления имеет некоторые особенности, связанные с тем, что толщина стенки у них значительна и нельзя пренебрегать неравномерным распределением напряжений в радиальном направлении.

В цилиндрическом сосуде, закрытом с торцов крышками и находящемся под внутренним давлением, действуют кольцевое, осевое (меридиональное) и радиальное напряжения. На рис. 114 показаны элемент, условно вырезанный из стенки, и напряжения, действующие по его граням. Кольцевые и осевые напряжения являются растягивающими, радиальные — сжимающими. Осевое напряжение равномерно распределено по толщине стенки:

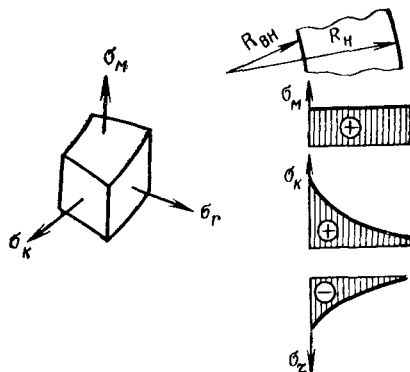


Рис. 114. Напряжения в толстостенном цилиндре

$$\sigma_m = pR_{вн}^2 / (R_{в}^2 - R_{вн}^2), \quad (85)$$

где  $R_{в}$  и  $R_{вн}$  — внешний и внутренний радиусы цилиндра;  $p$  — внутреннее давление.

Радиальные напряжения достигают наибольшей величины на внутренней стенке аппарата:

$$\sigma_r = -p, \quad (86)$$

на наружной стенке  $\sigma_r = 0$ . Кольцевые напряжения достигают наибольшего значения на внутренней стенке:

$$\sigma_{\kappa, \text{вн}} = p(R_{\text{в}}^2 + R_{\text{вн}}^2)(R_{\text{в}}^2 - R_{\text{вн}}^2), \quad (87)$$

на внешней стенке

$$\sigma_{\kappa, \text{в}} = p2R_{\text{вн}}^2(R_{\text{в}}^2 - R_{\text{вн}}^2). \quad (88)$$

Таким образом, наибольшие кольцевые напряжения те, которые достигают максимума на внутренней стенке аппарата.

В действующих в настоящее время нормах расчета [25] толщина стенки сплошной обечайки

$$s = 0,5D_{\text{вн}}(\beta - 1) + c + c_1, \quad (89)$$

внешний диаметр

$$D_{\text{в}} = \beta D_{\text{вн}} + 2c + c_1, \quad (90)$$

где  $\beta = D_{\text{в}}/D_{\text{вн}}$  — коэффициент толстостенности, определяемый из выражения

$$\ln \beta = p/([\sigma] \varphi). \quad (91)$$

Для удобства расчетов в табл. 16 приведены зависимости величины  $\beta$  от  $\ln \beta$ .

Т а б л и ц а 16

| $\ln \beta$ | $\beta$ | $\ln \beta$ | $\beta$ |
|-------------|---------|-------------|---------|
| 0,10        | 1,1     | 0,30        | 1,35    |
| 0,12        | 1,13    | 0,35        | 1,42    |
| 0,14        | 1,15    | 0,40        | 1,49    |
| 0,16        | 1,17    | 0,45        | 1,57    |
| 0,18        | 1,20    | 0,50        | 1,65    |
| 0,20        | 1,22    | 0,55        | 1,73    |
| 0,22        | 1,25    | 0,60        | 1,82    |
| 0,25        | 1,27    | 0,64        | 1,90    |

Для цельнокованых и многослойных аппаратов коэффициент прочности сварного шва  $\varphi = 1$ , для штампосварных аппаратов из малоуглеродистых и низколегированных сталей (22 К; 10Г2С)  $\varphi = 0,95$ , для среднелегированных сталей (25ХЗНМ; 20Х2МА; 12МХ)  $\varphi = 0,85$ .

Допускаемое напряжение  $[\sigma] = \eta \sigma^*$ , где  $\eta$  — коэффициент условий работы;  $\sigma^*$  — нормативное допускаемое напряжение ( $\sigma^* = \sigma_{\text{цч}}/n_{\text{цч}}$ ;  $\sigma^* = \sigma_{\text{т}}/n_{\text{т}}$  — из двух значений принимают наименьшее).

Запасы прочности принимают следующие:  $n_{\text{т}} = 1,5$ ;  $n_{\text{цч}} = 2,6$ . Для многослойных цилиндрических обечайек со спиральным расположением слоев во всех случаях  $n_{\text{цч}} = 2,6$ .

Механические характеристики некоторых наиболее распространенных конструкционных материалов для аппаратов высокого давления приведены в табл. 17. Для многослойных обечайек, когда ко-

| Марка    | Вид поставки                                   | Температура<br>стенки, °С | Предел<br>прочности,<br>Н/мм <sup>2</sup> | Предел<br>текучести,<br>Н/мм <sup>2</sup> |
|----------|------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Сталь 20 | Поковка толщиной,<br>мм:<br>300÷500<br>500÷800 |                           |                                           |                                           |
|          |                                                | 20                        | 363                                       | 186                                       |
|          |                                                | 200                       | 344                                       | 177                                       |
|          |                                                | 20                        | 353                                       | 177                                       |
|          |                                                | 200                       | 314                                       | 157                                       |
| 20Х2МА   | Лист до 150 мм                                 | 20                        | 389                                       | 441                                       |
|          |                                                | 200                       | 239                                       | 392                                       |
|          |                                                | 20                        | 589                                       | 441                                       |
|          |                                                | 200                       | 540                                       | 392                                       |
|          |                                                | 300                       | 490                                       | 343                                       |
| 22Х3М    | Поковка толщиной, мм:<br>до 200<br>200÷250     |                           |                                           |                                           |
|          |                                                | 20                        | 589                                       | 441                                       |
|          |                                                | 300                       | 471                                       | 392                                       |
|          |                                                | 20                        | 589                                       | 441                                       |
|          |                                                | 300                       | 490                                       | 343                                       |

эффициенты линейного расширения материалов отдельных слоев близки по значению, можно принять среднее значение допускаемого напряжения

$$[\sigma] = ([\sigma_1]s_1 + [\sigma_2]s_2 + [\sigma_3]s_3 + \dots) / (s_1 + s_2 + s_3 + \dots). \quad (92)$$

Если центральная труба «горячего» аппарата изготовлена из материала с более высоким коэффициентом линейного расширения (например, если труба выполнена из аустенитной хромоникелевой стали, а наружные слои — из углеродистой), то ее в расчете на прочность не учитывают.

Конструктивную прибавку  $c_1$  принимают в зависимости от технологии изготовления аппарата и допусков на разностенность и отклонение внутреннего и внешнего диаметров. Толщина плоских и слабо выпуклых днищ [22]

$$s = 0,45D \sqrt{p/([\sigma]\psi)} + c + c_1, \quad (93)$$

где  $D$  — внутренний диаметр аппарата;  $\psi = 1 + \Sigma d_i/D$  — коэффициент ослабления днища отверстиями;  $\Sigma d_i$  — максимальная сумма диаметров отверстий, расположенных на одном диаметре.

Выражение (93) применимо при условии, что сумма  $\Sigma d_i$  не превышает 0,6. Выпуклые днища рассчитываются по (17). Затворы с плоской металлической прокладкой рассчитывают аналогично фланцевым соединениям низкого и среднего давления.

Расчетное усилие на крышку

$$Q = Q_n + R_n, \quad (94)$$

где

$$Q_{\tau} = D_{\text{ср}}^2 p \pi / 4; R_{\text{н}} = \pi D_{\text{ср}} b q; \quad (95)$$

$D_{\text{ср}}$  — средний диаметр прокладки;  $b$  — ширина прокладки;  $q$  — удельное давление смятия прокладки (для красной меди  $q = 100$  Н/мм<sup>2</sup>; для алюминия  $q = 70$  Н/мм<sup>2</sup>; для мягкой стали  $q = 126$  Н/мм<sup>2</sup>; для монель-металла  $q = 152,5$  Н/мм<sup>2</sup>).

Расчетное усилие затвора с двухконусным obtюратором

$$Q = Q_{\text{д}} + Q_{\text{в}}, \quad (96)$$

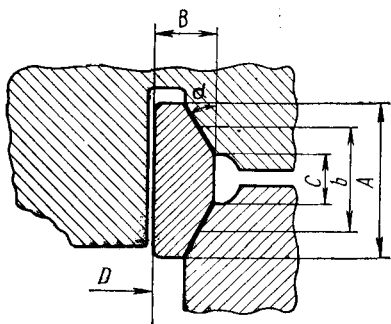


Рис. 115. К расчету двухконусного obtюратора

где  $Q_{\text{д}} = D_{\text{ср}}^2 p \pi / 4$  — равнодействующая сил внутреннего давления;  $Q_{\text{в}} = b \text{tg}(\alpha - \rho) p \pi / 2$  — осевая составляющая равнодействующей внутреннего давления;  $D_{\text{ср}} = D + 2B + (A - C/2) \text{tg} \alpha$  — средний диаметр;  $D$  — внутренний диаметр obtюратора;  $B$  — толщина obtюраторного кольца;  $b = (A + C)/2$  — ширина obtюраторного кольца по средней линии уплотнительной поверхности (размеры  $A, B, C$  даны по рис. 115);  $\alpha$  — угол конуса obtюратора;  $\rho$  — угол трения на уплотнительных поверхностях (для алюминиевых про-

кладок  $\rho = 15^\circ$ ). Диаметр шейки шпилек (мм)

$$d_{\text{ш}} = \sqrt{4KQ/\pi z [\sigma] + d_0^2}, \quad (97)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий крутящий момент при затяжке шпилек (для затвора с двухконусным obtюратором  $K = 1$ ; для затвора с плоской металлической прокладкой  $K = 1,2$ );  $Q$  — расчетное усилие, Н;  $z$  — количество шпилек, определяемое методом подбора из ряда чисел: 8; 10; 12; 16; 20; 24; 28; 32;  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение;  $d_0$  — диаметр центрального отверстия в шпильке, мм.

**Влияние температурных напряжений.** Температурные напряжения возникают вследствие неравномерного нагрева стенки толсто-стенного аппарата. Когда температура внутри аппарата выше, чем снаружи, внутренние более нагретые слои металла испытывают сжимающее действие со стороны более холодных внешних слоев. Поэтому на внутренней стенке появляются сжимающие напряжения, а на внешней — растягивающие.

В том случае, когда тепловой поток изнутри аппарата невелик и разность температур между внутренней и внешней стенками небольшая, температурные напряжения до определенных пределов облегчают работу аппарата, так как сжимающие температурные напряжения на внутренней стенке суммируются с растягивающими, вызванными давлением, которые как раз на внутренней стенке достигают наибольшей величины. В случае наружного обогрева

(довольно редком) на наружной стенке появляются сжимающие напряжения, а на внутренней — растягивающие, которые увеличивают и без того большие напряжения, вызванные давлением. Кольцевые температурные напряжения на внутренней и наружной поверхности определяют по формулам Лоренца:

$$\sigma_{t_{\text{вн}}} = \frac{\alpha E (t_{\text{н}} - t_{\text{вн}})}{2(1-\mu)} \left[ \frac{2k^2}{k^2 - 1} - \frac{1}{2,3 \lg k} \right]; \quad (98)$$

$$\sigma_{t_{\text{в}}} = \frac{\alpha E (t_{\text{н}} - t_{\text{вн}})}{2(1-\mu)} \left[ \frac{2}{k^2 - 1} - \frac{1}{2,3 \lg k} \right], \quad (99)$$

где  $\sigma_{t_{\text{вн}}}$  и  $\sigma_{t_{\text{в}}}$  — температурные напряжения на внутренней и внешней поверхностях;  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения;  $E$  — модуль упругости;  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{вн}}$  — температуры внешней и внутренней поверхностей цилиндра;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $k = R_{\text{в}}/R_{\text{вн}}$  — отношение внешнего радиуса к внутреннему.

При температуре стенки выше  $400^\circ\text{C}$  температурные напряжения частично выравниваются вследствие ползучести материала. В [25] при наружном обогреве колонны предлагается следующая формула для проверки совместного действия напряжений от давления и температурных напряжений:

$$[\beta/(3^2 - 1)] \sqrt{3p^2 + 3k_1 p \Delta t + (k_1 \Delta t)^2} \leq \sigma_{\text{т}}/1,1, \quad (100)$$

где  $k_1 = \alpha E (\beta - 1)/[(1 - \mu)\beta]$ ;  $\Delta t$  — перепад температуры по толщине обечайки.

**Пример 9.** Рассчитать кованосварную колонну высокого давления внутренним диаметром 800 мм, если давление в аппарате 32 Н/мм<sup>2</sup>, температура стенки  $300^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Рассчитаем цилиндрическую обечайку. Для этого принимаем за расчетное давление  $p = p_{\text{раб}} = 32$  Н/мм<sup>2</sup>, за расчетную температуру — рабочую температуру стенки сосуда. Прибавка на коррозию и конструктивная прибавка  $c + c_1 = 3,5$  мм. Для давления 32 Н/мм<sup>2</sup> и температуры стенки  $t = +300^\circ\text{C}$  выбираем для корпуса сталь 20Х2МЛ с пределом прочности  $\sigma_{\text{пч}} = 490$  Н/мм<sup>2</sup> и пределом текучести  $\sigma_{\text{т}} = 343$  Н/мм<sup>2</sup>. Принимаем  $n_{\text{пч}} = 2,6$  и  $n_{\text{т}} = 1,5$ . Тогда  $[\sigma] = \sigma_{300 \text{ о пч}}/n_{\text{пч}} = 490/2,6 = 188$  Н/мм<sup>2</sup>;  $[\sigma] = \sigma_{300 \text{ о ст}}/n_{\text{т}} = 343/1,5 = 229$  Н/мм<sup>2</sup>.

Принимаем  $[\sigma] = 188$  Н/мм<sup>2</sup>.

Коэффициент толстостенности  $\ln \beta = p/[\sigma] = 32/188 = 0,170$ , откуда  $\beta = 1,19$ .

Толщина цилиндрической обечайки  $s = 0,5D(\beta - 1) + c + c_1 = 0,5 \cdot 800(1,19 - 1) + 3,5 = 79,5$  мм. Принимаем  $s = 80$  мм;  $D_{\text{в}} = 960$  мм.

Рассчитаем днище. Его толщина

$$s_1 = 0,45D \sqrt{p/([\sigma]\varphi)} + c = 0,45 \cdot 800 \sqrt{32/(188 \cdot 0,75)} + 3,5 = 174,4 \text{ мм},$$

где  $\varphi = (D - \Sigma d_i)/D = (800 - 200)/800 = 0,75$ .

Принимаем  $s_1 = 180$  мм.

Рассчитаем затвор. Для этого по данным размерам и параметрам эксплуатации сосуда выбираем двухконусный затвор и размеры обтюраторного кольца:  $A = 100$  мм;  $B = 390$  мм;  $C = 30$  мм;  $D_1 = 758$  мм, угол конуса  $\alpha = 30^\circ$ , угол трения  $\rho = 15^\circ$ , расчетное усилие  $Q = Q_{\text{д}} + Q_{\text{в}} = D_{\text{ср}}^2 \rho \pi / 4 + D_{\text{ср}} b \lg(\alpha - \rho) \pi / 2 = 816 \cdot 32 \times 0,785 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 816 \cdot 65 \lg(30 - 15) \cdot 32 = 1,73 \cdot 10^7$  Н, где  $D_{\text{ср}} = 2B - 0,5(A - C) \lg \alpha = 758 + 23,9 - 0,5(100 - 30) \lg 30^\circ = 816$  мм — средний диаметр уплотнительной поверхности;  $b = 0,5(A + C) = 0,5(100 + 30) = 65$  мм — ширина обтюраторного кольца по средней линии уплотнительных поверхностей.

Рассчитаем шпильки. Для них выберем сталь 25Х1МФ с пределом текучести  $\sigma_{290^{\circ}\text{C}} = 638 \text{ Н/мм}^2$  при  $200^{\circ}\text{C}$  и  $\sigma_{300^{\circ}\text{C}} = 490 \text{ Н/мм}^2$  при  $300^{\circ}\text{C}$ . По пределу текучести допускаемое напряжение

$$[\sigma] = \sigma_{300^{\circ}\text{C}} / m = 490 / 2,0 = 245 \text{ Н/мм}^2.$$

Принимаем количество шпилек  $z=16$ , полагаем  $K=1$ ;  $d_0=18 \text{ мм}$ . Тогда диаметр шейки шпильки

$$d_{\text{ш}} = \sqrt{4KQ/(\pi z [\sigma])} + d_0^2 = \sqrt{4 \cdot 1 \cdot 1,73 \cdot 10^7 (3,14 \cdot 16 \cdot 245)} + 18^2 = 76 \text{ мм}.$$

Берем шпильку с диаметром шейки  $d_{\text{ш}}=83 \text{ мм}$  и резьбой М90×6.

## ГЛАВА 6

### КОЛОННЫЕ И БАШЕННЫЕ АППАРАТЫ

#### § 6.1. Классификация колонных и башенных аппаратов

К колонным и башенным аппаратам в химической технологии относят в основном оборудование для процессов взаимодействия между жидкостью и газом (ректификация, абсорбция и мокрая очистка газов), жидкостью и жидкостью (экстракция) и газом и твердым телом (адсорбция). Особое положение занимают реакторы колонного типа, рассмотренные в ч. 2.

Классический тип колонных аппаратов — тарельчатые и насадочные. В тарельчатых — контакт между жидкостью и газовой фазой осуществляется за счет многократного барботажа газа (или пара) через слой жидкости, а в насадочных — за счет стекания жидкости по элементам насадки. В обоих случаях жидкость стекает вниз под действием силы тяжести, а газовая фаза движется навстречу снизу вверх.

Один из способов ускорения процесса массообмена — увеличение скорости взаимодействующих фаз, за счет чего увеличивается турбулентность двухфазного потока, однако с увеличением скорости резко возрастает пено- и брызгоунос, устранить который очень трудно. Поэтому, например, в барботажных колоннах скорость пара, рассчитанная на полное сечение колонны, не превышает  $1 \div 1,5 \text{ м/с}$ .

В настоящее время ведутся усиленные работы по интенсификации процессов массообмена между жидкостью и газом за счет приложения к системе дополнительной энергии. Был разработан и освоен в промышленности ряд аппаратов с вращающимися элементами, в которых для интенсификации процесса применяется центробежная сила и ряд скоростных аппаратов, использующих энергию потока газа или жидкости.

На рис. 116 приведена классификация ректификационных и абсорбционных аппаратов по типу контактного устройства.

При выборе конструкции рабочих (контактных) элементов колонных аппаратов необходимо считаться с такими факторами, как гидравлическое сопротивление; диапазон изменения нагрузок по

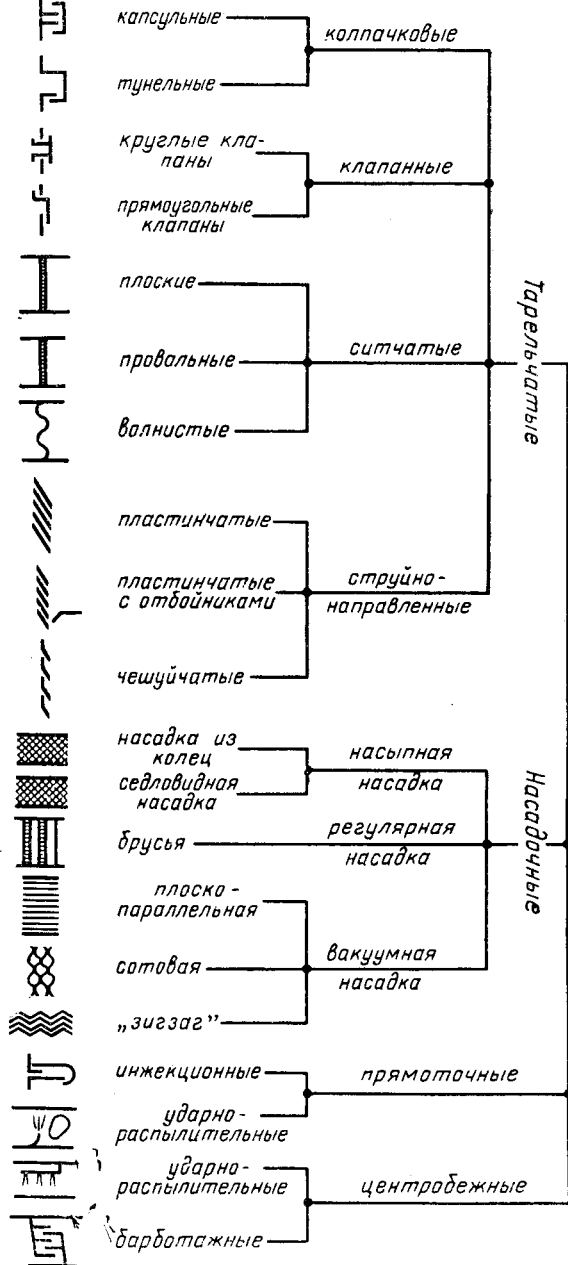


Рис. 116. Классификация ректификационных и абсорбционных колонных аппаратов

жидкой и газовой фазе, при котором аппарат работает устойчиво (диапазон должен быть достаточно широким); простота конструкции и надежность в эксплуатации.

Ректификационные и абсорбционные установки, как правило, представляют собой сложные агрегаты, в которых колонна связана с рядом вспомогательных аппаратов: кубами, кипятильниками, различными теплообменниками, сепараторами и др. Иногда эта связь чисто технологическая (через систему трубопроводов), а в некоторых случаях все аппараты конструктивно объединены в один агрегат. Абсорбционные колонны часто устанавливают группами (батареями). Колонны больших размеров обычно устанавливают под открытым небом. Трубопроводы, обслуживающие площадки и вспомогательное оборудование, крепятся к корпусу колонны. На верхнюю площадку устанавливают кран-укосину для монтажных и ремонтных работ. На колоннах монтируют много контрольно-измерительных приборов для измерения давления, температуры, состава смеси и др. На линиях ввода и вывода жидкости на колонны обязательно устанавливают гидравлические затворы, препятствующие прохождению газа через жидкостные патрубки. Затворы выполняют в виде U-образных участков трубопроводов или поперечных перегородок перед штуцерами. Колонны работают обычно при атмосферном давлении, повышенное давление и вакуум менее распространены.

Температурные пределы применения колонных аппаратов довольно велики: от  $-250^{\circ}\text{C}$  в криогенной технике до  $+350\div 400^{\circ}\text{C}$ .

## **§ 6.2. Тарельчатые колонны**

Конструкции тарельчатых колонн весьма разнообразны. Это объясняется чрезвычайно большим ассортиментом перерабатываемого сырья, широким диапазоном производительности и различным гидравлическим режимом колонн [4, 20]. В качестве конструкционного материала для изготовления колонных аппаратов наиболее широко применяют углеродистую и кислотостойкую сталь, реже — цветные металлы и чугун. В настоящее время осваиваются тарельчатые колонны из неметаллических материалов — керамики, графита и фторопласта.

В химической и нефтеперерабатывающей промышленности применяют тарельчатые колонны различных размеров: от небольших диаметром  $300\div 400$  мм до крупнотоннажных высокопроизводительных установок с колоннами диаметром  $5\div 12$  м. Высота колонны зависит от числа тарелок и расстояния между ними. Чем меньше расстояние, тем ниже колонна. Однако при уменьшении расстояния между тарелками увеличивается унос брызг и возникает опасность переброса жидкости с нижних тарелок на верхние, что существенно уменьшает к. п. д. установки. Поэтому обычно расстояние между тарелками  $250\div 300$  мм. По соображениям конструктивного порядка и возможности ремонта и очистки тарелок в колоннах большого диаметра расстояния между ними увеличивают до  $500\div 600$  мм.

Рекомендованные расстояния между тарелками приведены ниже:

|                                    |         |         |         |         |           |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Диаметр колонны, м .               | до 0,8  | 0,8—1,6 | 1,6—2   | 2—2,0   | более 2,4 |
| Расстояние между тарелками, мм . . | 200÷350 | 350÷400 | 400—500 | 500—600 | более 600 |

Кипятильники в ректификационных установках малой производительности делают в виде змеевиков, установленных непосредственно в кубе, но более часто кипятильник монтируют в виде выносного теплообменника, который устанавливают вертикально около куба, и связывают с ним двумя патрубками. Колонны периодического действия имеют кубы большой емкости, достаточной для приема одновременной загрузки продукта. В колоннах непрерывного действия не нужен большой объем кубовой жидкости и кубом в них является нижняя часть колонны высотой  $1 \div 2,5$  м. На рис. 117 показан общий вид тарельчатой ректификационной колонны. Она состоит из корпуса 3, переливных патрубков 1, кольцевой опоры 4, опорных колец 6, тарелок 2 и выносного кипятильника 5 и имеет ряд штуцеров для подачи продуктов и установки приборов. К тарелкам предъявляются следующие требования: они должны иметь высокий к. п. д, т. е. обеспечивать хороший контакт между жидкостью и паром, обладать малым гидравлическим сопротивлением, устойчиво работать при значительном колебании расходов пара и жидкости. Тарелки должны быть просты по конструкции, удобны в эксплуатации, нечувствительны к различным осадкам и отложениям, что особенно важно при работе с загрязненными жидкостями, и иметь малый вес. Наибольшее применение находят колпачковые, ситчатые, клапанные тарелки и струйно-направленные.

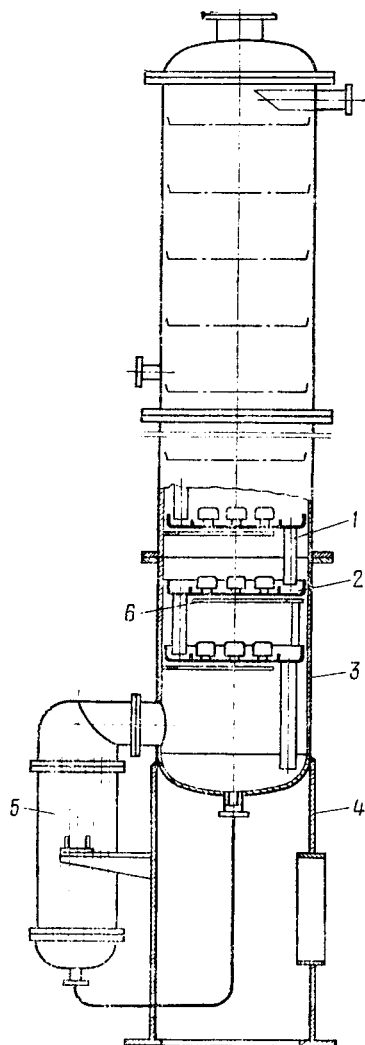


Рис. 117. Тарельчатая колонна

Колпачковые тарелки. Они сложны и металлоемки по сравнению с тарелками других типов. Некоторые их показатели уступают более современным типам тарелок, но они хорошо освоены и находят в промышленности наиболее широкое применение. Колпачки изготавливают круглыми и продолговатыми (туннельными), последние сейчас не находят широкого применения.

Колпачки различных типов отличаются конструкцией, размерами и способами крепления на тарелке. Стальные, медные и алюми-

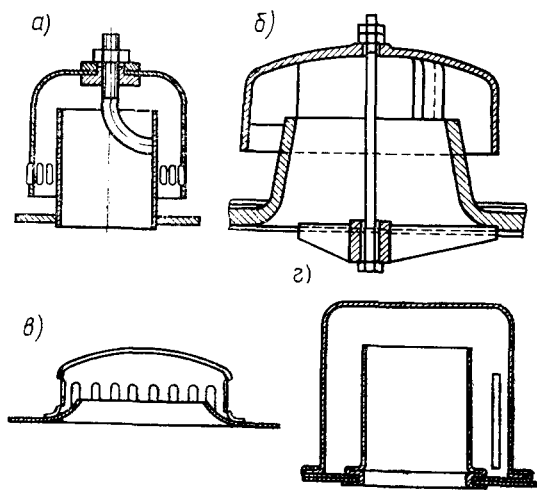


Рис. 118. Способы крепления колпачков к тарелке

новые колпачки штампуют, чугунные — отливают. Крепление колпачков на тарелке может быть разъемным или неразъемным. Разъемные соединения более сложны, однако они допускают регулировку уровня колпачка при монтаже тарелки. Стальные штампованные колпачки, которыми в настоящее время комплектуется большинство тарельчатых колонн, крепят с помощью изогнутой шпильки, приваренной к паровому патрубку (рис. 118, а). Колпачок

крепят на шпильке с помощью втулки и контргайки с шайбой. Патрубок развальцовывают в тарелке. Диаметр колпачков 60, 80, 100 или 150 мм. В некоторых конструкциях шпильку крепят к перекладине, сваренной в патрубок. Применяют групповую установку ряда колпачков с креплением их к общему несущему швеллеру. Чугунные колпачки крепят с помощью перекладины и стяжного болта (рис. 118, б). Неразъемные соединения колпачков осуществляют с помощью сварки или пайки. Неразъемный стальной колпачок (рис. 118, в) приваривают к тарелке точечной сваркой. Патрубок образуется отбортовкой отверстия в тарелке. Медные колпачки крепят к тарелке с помощью развальцовки (рис. 118, г) или пайки. Керамические колпачки устанавливают в тарелке на кислотоупорной замазке. Колпачки располагают на тарелке по вершинам равносторонних треугольников или в шахматном порядке. Расстояние между краями колпачков 40–60 мм. Если это расстояние велико, то ухудшается контакт между жидкостью и паром и образуется слой не вспененной (светлой) жидкости. При очень малом расстоянии возрастает сопротивление движению жидкости по тарелке, тарелка начинает «захлебываться» и уровень жидкости в разных ее частях становится различным.

Зазор между колпачками и краем тарелки должен быть минимальным. Если он по конструктивным соображениям получается значительным, то для предотвращения прорыва жидкости по краю тарелки устанавливают отражательные перегородки, направляю-

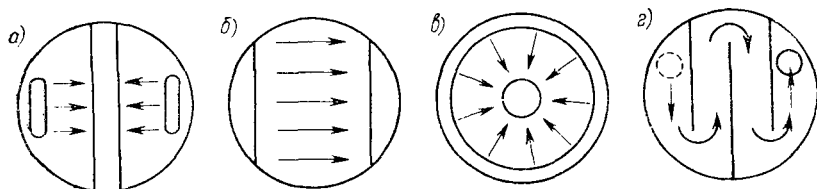


Рис. 119. Схемы движения жидкости по тарелке

щие поток жидкости к колпачкам. Благодаря расположению подающего и сливного патрубков на противоположных краях тарелки жидкость проходит через зону барботажу всех колпачков, что обеспечивает хороший контакт между жидкостью и газом.

Тарелки больших диаметров при значительном расходе жидкости делают двухпоточными (рис. 119, а) или четырехпоточными, чтобы предотвратить затопление тарелки жидкостью, т. е. устраивают на тарелке не один (как показано на рис. 119, б), а несколько сливных и наполняющих патрубков. На рис. 119, в изображена тарелка с центральным сливом. При небольшом расходе жидкости на тарелке устраивают зигзагообразный ход (рис. 119, г). Над верхним обрезом прорезей колпачков слой жидкости 15÷40 мм. Если высота этого слоя мала, то часть пара проскакивает, не успевая реагировать с жидкостью. При увеличении высоты слоя возрастает гидравлическое сопротивление тарелки, что особенно нежелательно для вакуумных колонн.

Переливы делают в виде сегмента, ограниченного перегородкой (рис. 120), или в виде овального или круглого патрубка. Чтобы предотвратить прорыв пара через переливной патрубок, нижний конец его опускают в слой жидкости и создают, таким образом, гидравлический затвор. Гидравлический затвор должен быть также обеспечен на патрубке, опущенном с самой нижней тарелки. Для этого патрубок делают удлиненным, чтобы он был опущен ниже уровня жидкости в кубе, или на корпусе делают специальный кар-

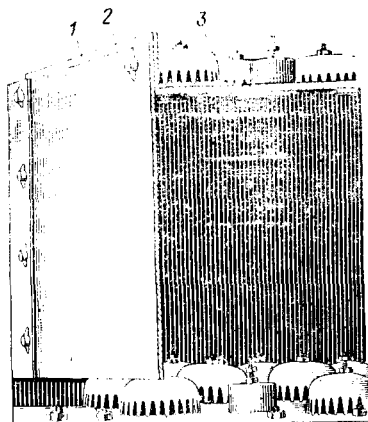


Рис. 120. Сегментный перелив колпачковой колонны:

1 — регулирующая планка; 2 — сегментный перелив; 3 — тарелка

ман. Высоту уровня жидкости на тарелке регулируют с помощью переливной планки, укрепленной болтами на краю переливной стенки. В планке под болты делают продольные прорезы, что допускает ее небольшое перемещение.

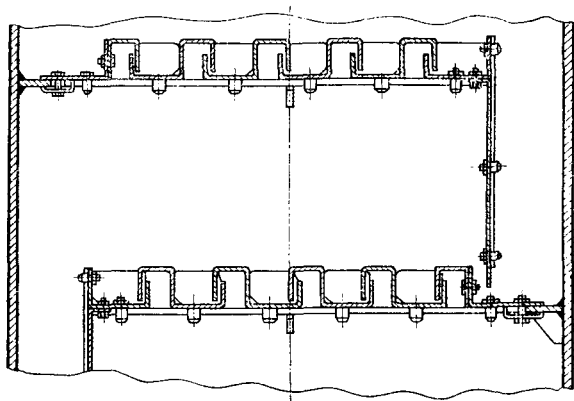


Рис. 121. Колонна с S-образными тарелками

В нефтяной промышленности распространены тарелки, образованные из S-образных штампованных элементов, которые соединяют с помощью торцовых пластинок (рис. 121). Их основное пре-

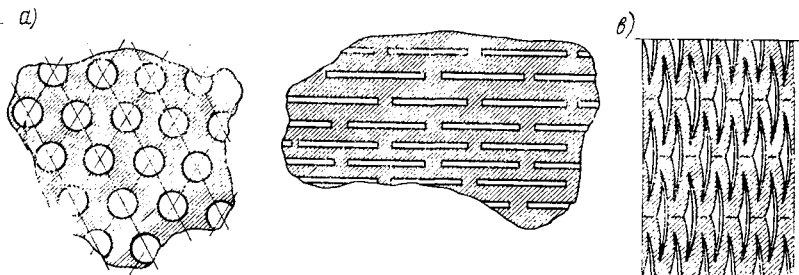


Рис. 122. Форма отверстий в ситчатых тарелках

имущество — простота конструкции и большая жесткость штампованных элементов. S-образные элементы представляют собой колпачки с односторонним выходом пара. Пар из них выходит в том же направлении, что и движущаяся по тарелке жидкость.

Ситчатая тарелка — это лист с пробитыми в нем круглыми (а), щелевидными (б) или просечными треугольными (в) отверстиями размером  $2 \div 15$  мм (рис. 122). Пар, проходящий в отверстия, барботирует через слой жидкости, которая стекает через переливные патрубки. Скорость пара в отверстиях  $10 \div 12$  м/с. Ситчатые тарелки работают также и в провальном режиме, тогда переливные устройства на тарелке отсутствуют, а жидкость стекает в отверстие навстречу пару.

Отверстия в тарелках, работающих в провальном режиме, несколько крупнее, чем в переливных.

Интересна волнистая ситчатая тарелка, показанная на рис. 123. Волны придают тарелке повышенную жесткость и позволяют применять ее при большом диаметре колонны без опорных балок.

Ситчатые тарелки просты по конструкции и эффективны. Недостаток их — необходимость точного регулирования заданного режима (особенно по расходу газа) и чувствительность к осадкам и отложениям, забивающим отверстия.

Ситчатые тарелки применяют в основном для колонн малого размера, так как при диаметрах более 2,5 м распределение жидкости на тарелке становится неравномерным.

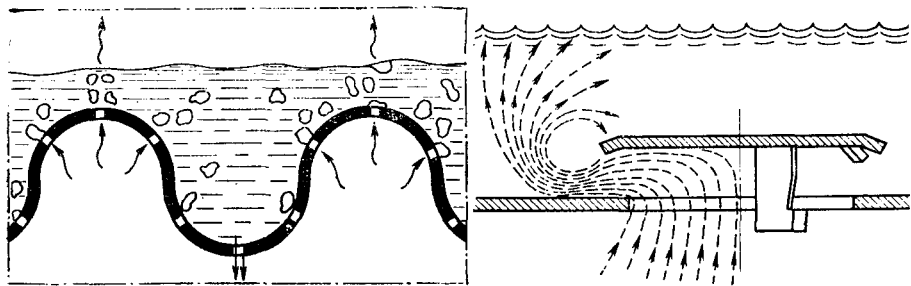


Рис. 123. Волнистая ситчатая тарелка Рис. 124. Круглый клапанный колпачок

Клапанные тарелки. Основные элементы клапанной тарелки — подъемные клапаны круглой или прямоугольной формы, закрывающие отверстия в тарелке. Конструктивно клапан выполнен так, что подъем его возможен только на определенную величину. В клапане, показанном на рис. 124, величина открытия ограничивается отогнутыми лапками. При определенной скорости паров в отверстиях клапаны уравниваются потоками пара и при дальнейшем увеличении нагрузки начинают подниматься таким образом, что скорость пара в сечении между клапаном и полотном тарелки остается примерно постоянной. Следствием этого является равномерное распределение пара по площади тарелки, уменьшение уноса жидкости и меньшее гидравлическое сопротивление. Широкий диапазон устойчивой работы, малый вес и простота конструкции делают применение клапанных тарелок перспективным.

Клапаны изготовляют штамповкой из листового металла толщиной  $2 \div 3$  мм. Диаметр дисковых клапанов  $50 \div 100$  мм, полная высота подъема  $8 \div 15$  мм. В крайнем нижнем положении между клапаном и плоскостью тарелки имеется зазор  $1 \div 1,5$  мм.

Клапанные тарелки имеют сливные устройства того же типа, что колпачковые и ситчатые.

Струйно-направленные тарелки. Их следует выделить в отдельную группу, в которой паровые струи имеют то же направление, что и текущая по тарелке жидкость.

Чешуйчатые тарелки представляют собой лист, на котором выдавлены плоские или полукруглые язычки, придающие пару направленное движение. Тарелка, изображенная на рис. 125, имеет ряд пластинчатых клапанов, открывающихся под напором пара. Жидкость, поступившая на тарелку, встречается с газом или паром, который с большой скоростью ( $20 \div 50$  м/с) проходит через щели тарелки. Жидкость диспергируется потоком газа и в виде мелких капель проносится вдоль тарелки к сливному стакану.

Конструкцию тарелки и способ ее соединения с корпусом выбирают в зависимости от диаметра колонны и конструкционного материала. При диаметре менее 1000 мм корпус колонны обычно

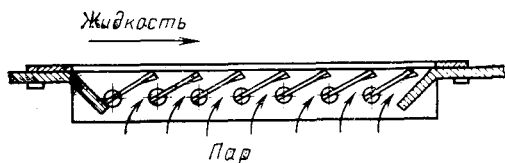


Рис. 125. Тарелка с пластинчатыми клапанами

собирают из небольших царг длиной не более  $2 \div 2,5$  м. В каждой царге помещается четыре — семь тарелок. При диаметре колонны более 1000 мм возможно применение цельносварного корпуса. Тарелки небольшого диаметра (до 1600 мм) изготавливают в виде цельного листа с бортами. Монтируют

их через верх колонны. Тарелки больших размеров делают разъемными, состоящими из нескольких сегментов. Монтируют их как через верх колонны, так и через боковые люки, размер которых должен быть достаточным, чтобы через них можно было пронести части тарелки. Люки устанавливают через каждые четыре — десять тарелок.

Соединение тарелки с корпусом колонны должно быть конструктивно простым, герметичным и обеспечивать легкую замену тарелок. Простой способ крепления — приварка или припайка непосредственно к корпусу, но при нем трудно заменять тарелки и избегать их коробления. Поэтому такое соединение применяют редко и обычно только на колоннах малого диаметра. Разъемные соединения, как правило, обеспечивают регулирование горизонтальности тарелки. Для колонн малого диаметра (до 1000 мм) применяют этажерочный способ, при котором нижняя тарелка опирается на опорное кольцо, приваренное к царге колонны, следующая — на полукольцо, приваренное к нижней тарелке, и т. д. Горизонтальность тарелок устанавливают с помощью регулировочных винтов.

Сложен по конструкции, но удобен узел соединения, показанный на рис. 126. Тарелка опирается на кольцо, состоящее из двух частей и имеющее прорези. Кольцо распирается двумя винтами, при этом прорези надеваются на небольшие выступы, приваренные к корпусу колонны. Тарелка крепится к кольцу с помощью ряда шпилек, попарно установленных по периметру. Шпильки позволяют точно отрегулировать уровень тарелки. Зазор между тарелкой и корпусом колонны должен быть надежно уплотнен. Уплотняют с помощью сальникового устройства. В зазор накладывают асбестовый или

резиновый шнур, который прижимается стальным кольцом или специальными прижимными винтами. Тарелки, состоящие из нескольких частей, крепят к кольцу, приваренному к корпусу колонны, и к балочкам, которые также приваривают к корпусу колонны или крепят на болтах. Для обеспечения герметичности соединения части тарелок укладывают на прокладках.

Тарелки в колонне необходимо устанавливать строго горизонтально, так как при перекосе часть колпачков оказывается не залитыми жидкостью и через эти колпачки устремляется основной поток пара, что резко ухудшает работу колонны. Не допускаются коробление тарелок и прогиб их под действием собственного веса и веса жидкости. Максимальное отклонение отдельных точек тарелки от горизонтальной плоскости не должно превышать 6 мм. Для обеспечения этого требования тарелки больших диаметров укрепляют снизу ребрами жесткости.

Колпачковые и ситчатые тарелки нормализованы. Задача конструктора — правильно подобрать тарелки по существующим ГОСТам и нормам.

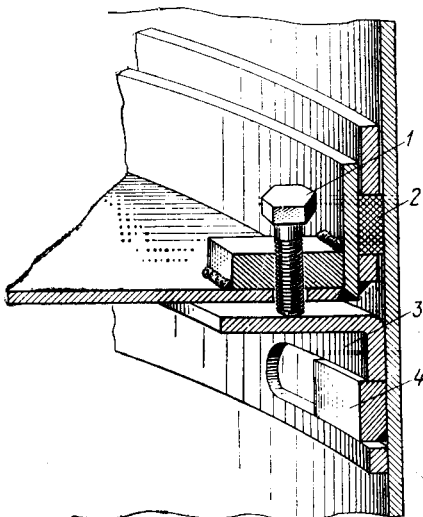


Рис. 126. Узел крепления тарелок на разъемном кольце:

1 — регулирующий винт; 2 — сальниковое уплотнение; 3 — разъемное кольцо из двух половин; 4 — бобышка, приваренная к корпусу колонны

### § 6.3. Насадочные колонны

Насадочные колонны широко применяют для процессов абсорбции, очистки, охлаждения и увлажнения газов, иногда ректификации. Насадочные колонны удовлетворительно работают только при обильном и равномерном орошении насадки жидкостью. Различаются два основных режима работы насадочных аппаратов: пленочный, при котором жидкость, омываемая газом, стекает по элементам насадки, и эмульгационный, когда весь аппарат заполнен жидкостью, а через слой ее между элементами насадки барботирует газ.

Основные элементы насадочных колонн — насадка, опорные колосники, устройства для орошения и распределения жидкости.

**Насадки.** По способу расположения насадки по высоте аппарата колонны подразделяют на полностью насаженные, разделенные на секции (рис. 127) и частично насаженные. Колонны с насадкой, загружаемой навалом, имеют обычно высоту слоя не более  $6 \div 8D$ . Дальнейшее увеличение высоты слоя ограничивается тем обстоятельством, что жидкость, стекающая по беспорядочно загруженной насадке, перемещается к периферии и часть насадки остается не-

смоченной. Когда требуется высота слоя более  $6 \div 8D$ , насадку в аппарате располагают отдельными слоями (секциями). После каждого слоя жидкость собирают и с помощью распределительных устройств равномерно орошают нижний слой насадки. Колонны, частично загруженные, имеют над слоем насадки значительное свободное пространство, в котором жидкость реагирует с газом в распыленном состоянии.

К насадке предъявляются следующие основные требования: большая поверхность, нечувствительность к загрязнениям и осадкам, малое гидравлическое сопротивление, простота изготовления и низкая стоимость.

Различаются насадки насыпные (из отдельных элементов) и хордовые (из полос, пластин, решеток).

**Насыпные насадки.** На рис. 128, а—в показаны наиболее распространенные элементы насыпных насадок.

Кольца Рашига (рис. 128, а) диаметром  $10 \div 150$  мм применяют часто. Они просты по конструкции, дешевы в изготовлении и обеспечивают удовлетворительный контакт между жидкостью и газом. Лучше по своим показателям кольца Палля (рис. 128, б). Они в отличие от колец Рашига имеют язычки, отогнутые внутрь. Седловидная насадка (рис. 128, в) предпочтительна при работе с продуктами, загрязняющими насадку. Элементы насадки изготовляют из керамики, фарфора или тонколистового металла. В промышленных колоннах в основном применяют насадочные кольца диаметром 25 и 50 мм.

Рис. 127. Колонна с насадкой, разделенной на секции:  
1 — оросительная тарелка; 2 — перераспределительные устройства; 3 — насадка; 4 — корпус; 5 — люки

Насадка должна быть засыпана ровным слоем. Образование пустот или щелей резко ухудшает работу колонны. Насыпную насадку укладывают на опорную решетку (колосник), которая должна иметь минимальное гидравлическое сопротивление и обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдержать вес насадки и удерживаемой ею жидкости. Опорные решетки в виде плит с отверстиями применять не рекоменду-

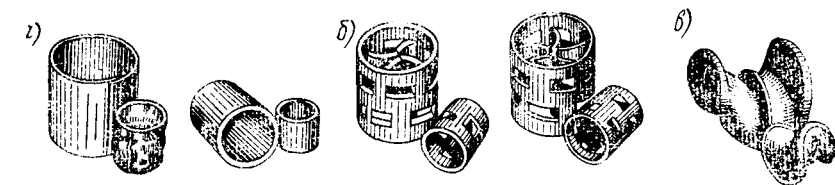


Рис. 128. Насадочные элементы

ется, так как они имеют значительное гидравлическое сопротивление.

Металлические решетки иногда изготовляют из вертикально поставленных полос, между которыми устанавливают дистанционные втулки. Собранную решетку стягивают шпильками. Решетки больших размеров выполняют из нескольких секций, укладываемых на опорные балки (рис. 129). Просвет между колосниками решетки должен быть не более  $0,6 \div 0,7$  от наименьшего размера насадочного элемента. Колосниковые решетки малых аппаратов делают цельносварными. Хорошая опорная конструкция для колонн малого диаметра — решетки из просечно-вытяжного листа.

Колосниками в футерованных башнях служат каменные брусья или кислотоупорный кирпич, на которые укладывают два ряда колец большого диаметра ( $100 \times 100$  или  $150 \times 150$  мм), а затем загружают кольца меньших размеров. Брусья колосниковой решетки опираются на столбы из кислотоупорных камней, стенки с арками или стальные балки, защищенные резиной или кислотоупорным бетоном.

Хордовые насадки. Насадки хордовые делают из крупных элементов: деревянных, пластмассовых или керамических брусьев, сеток и гофрированных листов. За послед-

нее время освоены плоскопараллельные и сотовые насадки, состоящие из вертикально установленных пластин или сотовых элементов. Они обеспечивают хороший контакт между жидкостью и газом и в то же время имеют малое гидравлическое сопротивление.

Плоскопараллельную насадку с успехом применяют в вакуумных колоннах, где особенно важно снизить гидравлическое сопротивление. Она представляет собой пакет пластин высотой  $0,5 \div 0,8$  м, стянутый болтами. Зазоры между пластинами фиксируются с помощью дистанционных втулок. Основные типы насадок для вакуумных колонн — плоскопараллельная (рис. 130, а), сотовая (рис. 130, б) и зигзагообразная (рис. 130, в).

Насадочные колонны имеют люки для разгрузки и загрузки насадки, которые устанавливают в верхней и нижней точках каждого слоя. Патрубки для входа газа снабжают козырьками или зонтами, препятствующими затеканию в них жидкости.

Большие кислотные башни, работающие без давления, футеруют в несколько слоев кислотоупорным кирпичом. В этом случае футеровка представляет собой самостоятельную конструкцию, а металлический корпус является лишь кожухом, придающим кирпичной

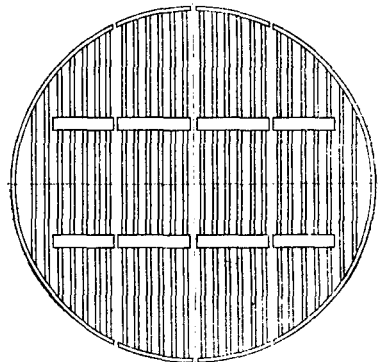
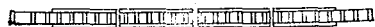


Рис. 129. Составная опорная решетка

кладке дополнительную устойчивость. На рис. 131 изображена промывная кислотная башня с арочной конструкцией опоры под посадку. Крыша башни футерована кислотоупорным цементом. Между дном башни и фундаментом имеется свободное пространство для осмотра и ремонта дна. Дно опирается на балки, передающие нагрузку на фундамент. Если башня подлежит оклейке полиизобутиленом или другим листовым материалом, то сварные швы стального корпуса делают стыковыми.

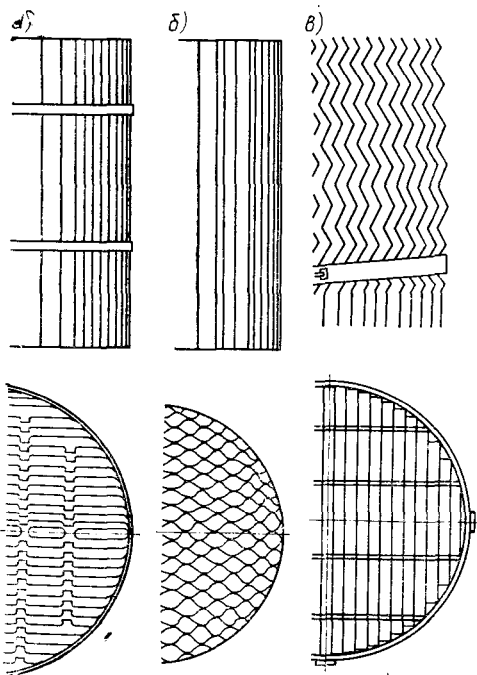


Рис. 130. Элементы насадок для вакуумных колонн

**Оросительные устройства.** Оросители — ответственные элементы насадочных колонн, от которых зависит удовлетворительная работа всей колонны [7]. К ним предъявляются следующие основные требования: 1) орошение должно быть равномерным по площади поперечного сечения колонны; 2) изменение расхода жидкости не должно отражаться на равномерности орошения; 3) распыление жидкости оросителем должно быть минимальным, так как при этом увеличивается унос брызг; 4) высота, занимаемая оросительным устройством, должна быть минимальной; 5) ороситель не должен быть чувствителен к осадкам и загрязнениям, содержащимся в жидкости; 6) ороситель должен быть прост по конструкции и удобен в ремонте.

Многочисленные конструкции оросителей подразделяются на струйчатые (точечные) и разбрызгивающие.

**Струйчатые оросители.** Из них жидкость вытекает на насадку отдельными струйками через отверстия или прорези. Такое орошение целесообразно при ограниченных расходах жидкости и когда унос брызг нежелателен или недопустим. Важная характеристика струйчатого оросителя — число точек орошения на  $1 \text{ м}^2$ , т. е. число струй, попадающих на  $1 \text{ м}^2$  поперечного сечения насадки. Необходимое число точек орошения, рекомендуемое по данным разных авторов, изменяется в довольно широких пределах. Ориентировочно можно принимать для беспорядочно засыпанной насадки  $20 \div 25$  точек на  $1 \text{ м}^2$  и для насадки, уложенной рядами, — 50 точек на  $1 \text{ м}^2$ .

Для аппаратов диаметром до 3 м применяют струйчатые оросители в виде сплошных распределительных плит. При большем диаметре используют распределительные желоба или плиты в виде отдельных секторов. На рис. 132 показана распределительная плита, представляющая собой тарелку с патрубками 2, через которые пе-

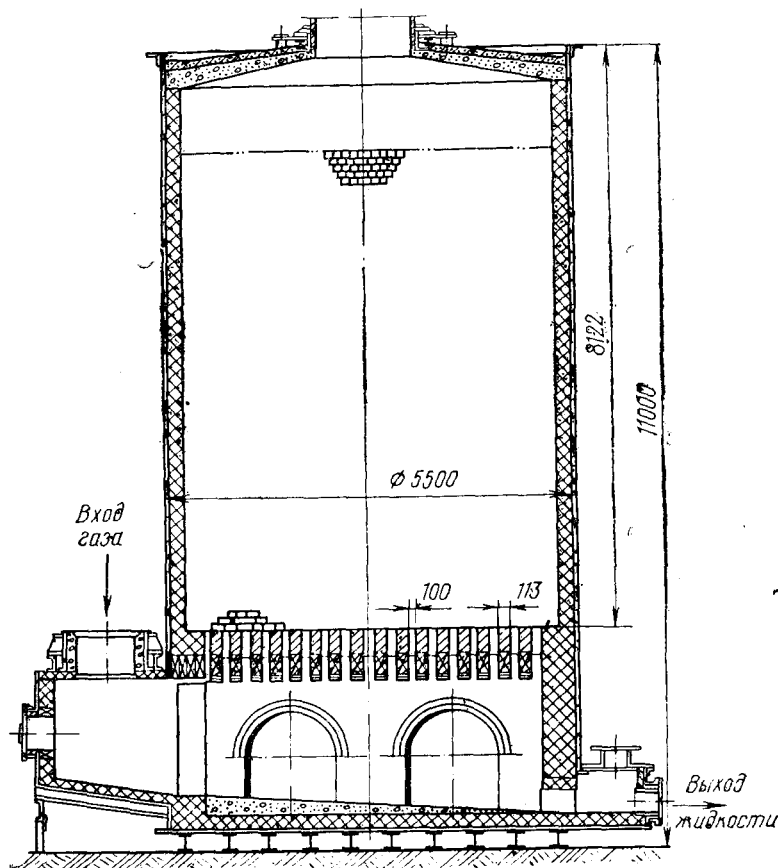


Рис. 131. Кислотная башня

ретекает жидкость. Для равномерного слива жидкости патрубки имеют прорези. Уровень тарелки регулируют с помощью установочных винтов 3. Диаметр тарелки равен  $0,6 \div 0,7$  от диаметра аппарата. Жидкость поступает на тарелку через патрубок 1. Как видно из рисунка, периферийные участки насадки не орошаются, предполагается, что они будут заполняться жидкостью при ее растекании в слое насадки.

В аппаратах большого диаметра применяют распределительные желоба (рис. 133), состоящие из ряда параллельных и главного распределительного желобов, расположенного над ними. Жидкость

из желобов стекает через прямоугольные или треугольные прорези. Желоба являются громоздкими оросителями и требуют тщательной регулировки горизонтальности, которую осуществляют установочными винтами.

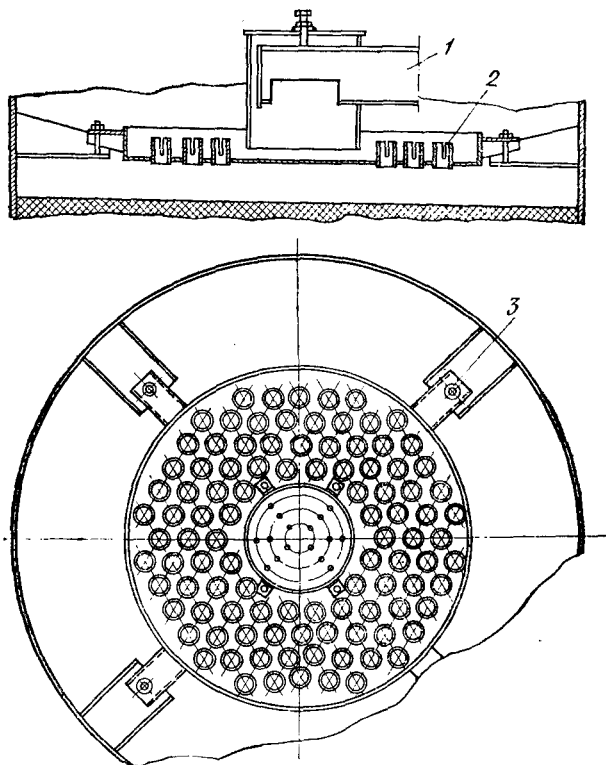


Рис. 132. Распределительная плита

В некоторых случаях применяют оросители в виде ряда параллельных труб с отверстиями, через которые под слабым напором вытекает жидкость.

Разбрызгивающие оросители гораздо более компактны по сравнению со струйными. Они могут обеспечить орошение значительной площади из одной точки. Их основной недостаток — распыление части жидкости. Простейший вид разбрызгивающего оросителя — перфорированный стакан (рис. 134), в который жидкость подают под напором  $4 \div 6$  м. Стаканы изготовляют из металла и керамики и применяют в основном для орошения колонн, работающих на чистой жидкости. Отверстия в стакане направлены в разные стороны, благодаря чему обеспечивается равномерное распределение орошения.

Разбрызгивающие вращающиеся звездочки (рис. 135) применяют в основном при башенном способе производства серной кислоты. Звездочка имеет ряд наклонных лопастей различной длины, на которые подается жидкость. Благодаря разной длине лопастей жидкость поступает на различные точки насадки. Оросители с разбрызгивающей звездочкой применяют для аппаратов диаметром до 10 м. Они в отличие от оросителей других типов требуют механического привода.

Многоконусные (дефлекторные) оросители (рис. 136) используют преимущественно в колоннах большого диаметра (до 8 м). Действие этих оросителей основано на обтекании жидкостью конусов, имеющих различные углы наклона, в результате чего возникает ряд струй, имеющих форму зонтов. Подбирая углы наклона зонтов, можно изменять распределение жидкости по поверхности насадки. Многоконусные оросители имеют высокую пропускную способность по жидкости, но чувствительны к колебаниям расхода.

Значительное распространение получили центробежные форсуны

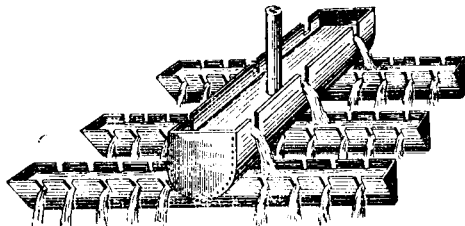


Рис. 133. Распределительные желоба

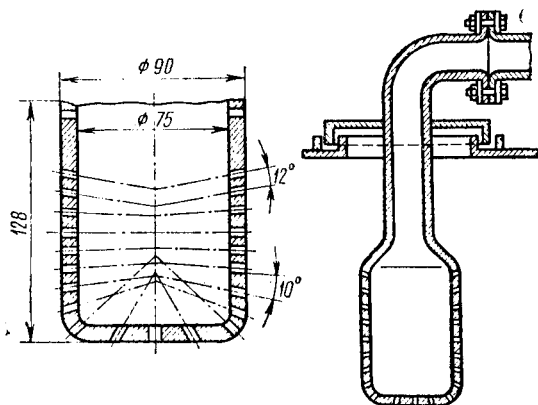


Рис. 134. Ороситель в виде перфорированного стакана

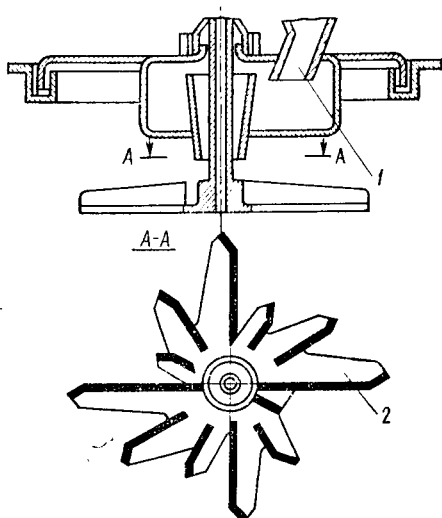


Рис. 135. Разбрызгивающая звездочка:  
1 — питающий патрубок; 2 — звездочка

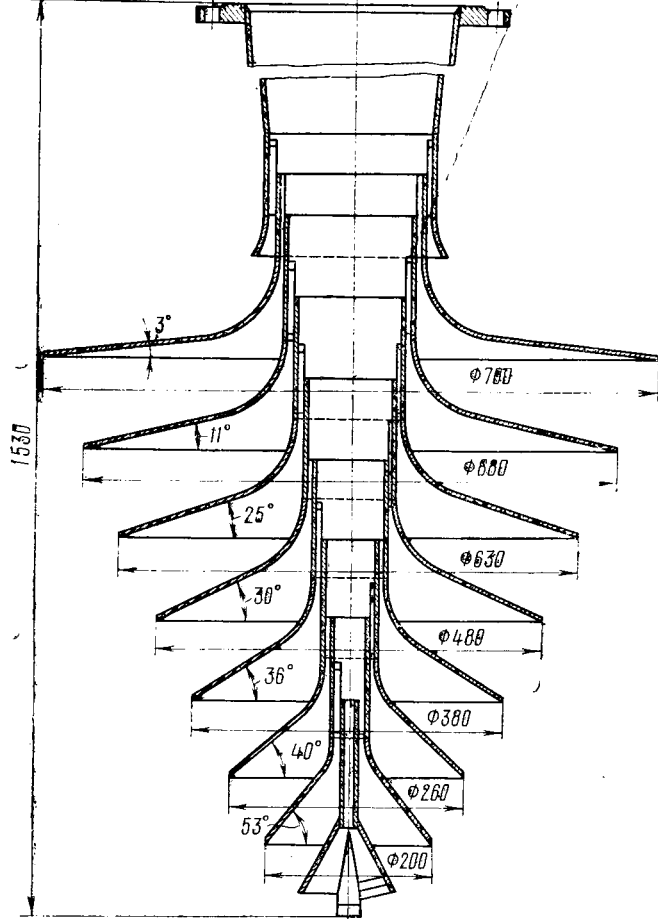


Рис. 136. Многоконусный ороситель

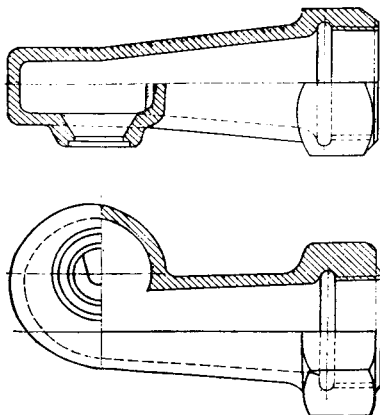


Рис. 137. Форсунка с тангенциальным вводом жидкости

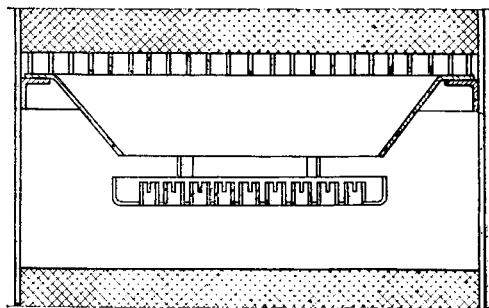


Рис. 138. Тарелка для перераспределения жидкости

ки с тангенциальным вводом жидкости (рис. 137). Жидкость входит в кольцевую камеру форсунки, где приобретает вращательное движение и за счет центробежной силы разбрызгивается из нижнего отверстия. Тангенциальные форсунки обеспечивают интенсивное и равномерное орошение в радиусе  $2 \div 2,5$  м. При орошении скрубберов большого диаметра устанавливают несколько форсунок.

Наряду с описанными выше оросителями имеется множество специфических конструкций, однако принципы их действия мало чем отличаются от описанных выше.

В насадочных колоннах, разделенных по высоте на секции, после каждого слоя насадки устанавливают устройства, перераспределяющие жидкость. На рис. 138 показан узел, в котором распределительное устройство совмещено с колосниковой решеткой. Жидкость с помощью воронки собирается на оросительную тарелку и через патрубки сливается на нижний слой насадки.

#### § 6.4. Колонны специальных типов

В отдельных отраслях промышленности применяют специальные колонные аппараты. К ним относятся, например, колонны содового производства, которые собираются из чугунных царг различной конструкции. Дистилляционная содовая колонна (рис. 139) состоит из группы тарелок с одним большим колпачком (рис. 140) и группы многоколпачковых тарелок. В царгах верхней части колонны установлены теплообменные элементы с горизонтальным пучком труб. Содовые колонны имеют большое количество люков и съемных крышек для очистки тарелок от осадков и отложений.

В рабочих элементах колонных аппаратов, работающих в скоростных режимах, осуществляется прямоток жидкости и газовой фазы, поэтому после каждого элемента необходимо производить сепарацию брызг.

В настоящее время разработано много типов прямоточных устройств. На рис. 141 показан один из них — прямоточная тарелка с плоскими перегородками.

Жидкость, поступившая на тарелку 1, увлекается потоком пара в контактную полость 2. За-

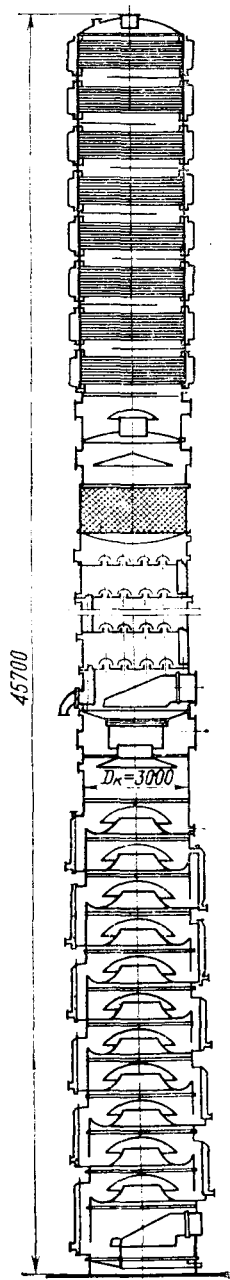


Рис. 139. Дистилляционная содовая колонна

тем в сепарационном пространстве 3 происходит разделение жидкости и пара, пар поднимается на следующую тарелку, а жидкость сливается вниз и увлекается в следующую контактную полость; таким образом, жидкость на одной тарелке многократно вступает в контакт с паром.

Из массообменных аппаратов, использующих центробежную силу, широкое практическое применение нашли сравнительно немногие конструкции, в частности ротационные дистилляционные аппараты пленочного типа, предназначенные для ректификации высококипящих органических смесей в глубоком вакууме. Контакт между

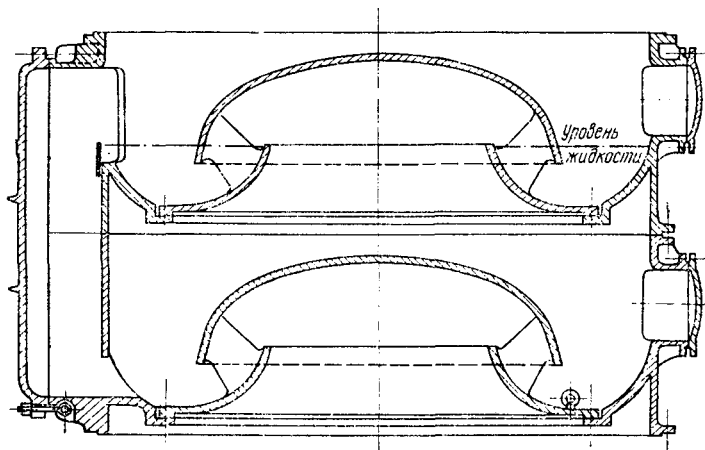


Рис. 140. Тарелка дистилляционной колонны

жидкостью и газом осуществляется в тонкой пленке на боковой поверхности аппарата. Жидкость вводится в штуцер, расположенный в средней части аппарата. Высококипящий компонент отводится через нижний штуцер. Поднимающиеся вверх пары частично конденсируются на поверхности ротора. Жидкость за счет центробежной силы переносится на обогреваемые стенки, где вновь испаряется.

На рис. 142 показан пленочный испаритель. На валу, делающем  $100 \div 150$  об/мин, закреплен ряд прямых лопастей. Для теплообмена к корпусу аппарата приварен ряд рубашек. В верхней части аппарата имеется сепаратор брызг.

### § 6.5. Расчет колонных аппаратов

Основные размеры колонных аппаратов определяют на основании технологических и гидродинамических расчетов. Полученные размеры округляют до нормализованных. В настоящем параграфе рассматривается только механический (прочностной) расчет колонн.

**Расчет корпуса колонны.** Небольшие колонны, работающие под давлением, рассчитывают как обычные емкостные аппараты. Колонны больших размеров, установленные под открытым небом, представляют собой ответственные сооружения. Их необходимо рассчитывать на совместное действие давления, сил тяжести и ветровых нагрузок. В районах, подверженных землетрясениям, колонны проверяют и на действие сейсмических сил. Все основные размеры колонны предварительно выбирают по аналогии с подобными конструкциями.

Весовая нагрузка вызывает вертикальную сжимающую силу. Различают максимальную массу колонны  $Q_{\max}$  и минимальную массу  $Q_{\min}$ . Максимальный вес складывается из веса самого аппарата, всех конструкций, опирающихся на колонну, изоляции и жидкости при гидравлическом испытании агрегата. Минимальный вес аппарата — это вес пустого аппарата без внутренних устройств.

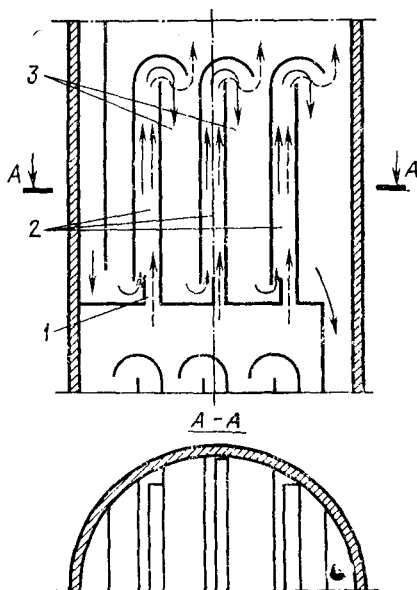


Рис. 141. Секционная прямоточная тарелка с плоскими перегородками

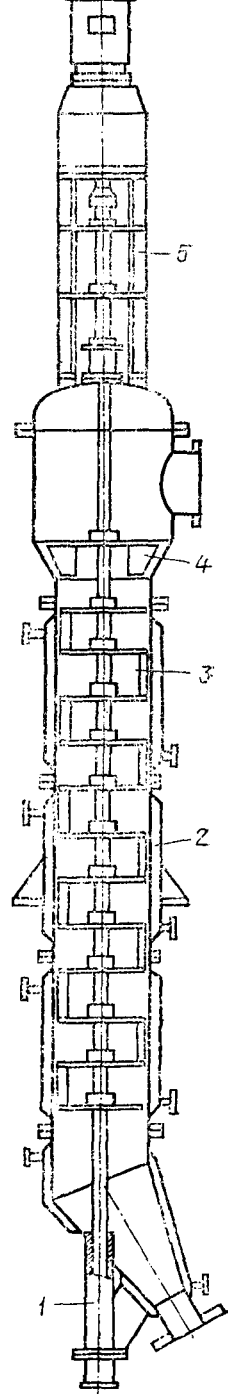


Рис. 142. Ротационный испаритель пленочного типа:

1 — концевой подшипник; 2 — корпус; 3 — мешалка с лопастями; 4 — сепаратор брызг; 5 — привод

В колоннах больших размеров вес воды при полном заливе может достигать весьма значительной величины, поэтому их испытывают гидравлически перед монтажом в горизонтальном положении, а после ремонтов проводят пневматическое испытание.

Консольно закрепленные элементы конструкций создают также изгибающий момент.

Ветровое давление вызывает изгибающий момент, который достигает максимума у основания колонны. Величину удельного ветрового напора  $q$  определяют в зависимости от географического района и высоты расчетного участка над уровнем земли [30]. Значения скоростного напора ветра ( $H/m^2$ ) приведены в табл. 18. При

Таблица 18

| Географические районы | Высота над поверхностью земли, м |      |      |      |      |      |
|-----------------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|
|                       | до 10                            | 20   | 30   | 40   | 60   | 100  |
| I                     | 270                              | 365  | 425  | 425  | 520  | 595  |
| II                    | 350                              | 470  | 550  | 630  | 680  | 770  |
| III                   | 450                              | 610  | 710  | 810  | 870  | 990  |
| IV                    | 550                              | 740  | 865  | 990  | 1065 | 1210 |
| V                     | 700                              | 945  | 1100 | 1260 | 1355 | 1540 |
| VI                    | 850                              | 1150 | 1330 | 1530 | 1645 | 1870 |
| VII                   | 1000                             | 1350 | 1570 | 1800 | 1935 | 2200 |

Примечание. Величина ветрового напора для промежуточных значений высот определяется интерполированием.

промежуточных значениях высоты над поверхностью земли значения  $q$  определяют интерполированием. Географические районы определяют по карте [30]. Величину скоростного напора ветра иногда дополнительно уточняют в связи с климатическими данными района строительства.

Колонну рассчитывают как консольную балку, нагруженную равномерно распределенной ветровой нагрузкой, действующей на корпус колонны, и сосредоточенными силами, которые являются равнодействующими сил ветрового давления на отдельные элементы конструкции (лестницы, площадки, теплообменники и др.). Для определения момента от распределенной нагрузки колонну разбивают на вертикальные участки и вычисляют равнодействующую каждого из них и точку ее приложения. Равнодействующая

$$P = \beta c q D H, \quad (101)$$

где  $\beta$  — коэффициент увеличения скоростного напора ветра за счет динамического воздействия, вызванного порывами ветра;  $c$  — аэродинамический коэффициент обтекания (для круглых аппаратов  $c = 0,6$ );  $q$  — значение ветрового напора на высоте, соответствующей середине расчетного участка,  $H/m^2$ ;  $D$  — наружный диаметр колонны с учетом тепловой изоляции, м;  $H$  — высота расчетного участка,

м;  $DH$  — площадь вертикальной проекции расчетного участка, м<sup>2</sup>.  
 Для приближенного определения ветровой нагрузки на лестницы и площадки вводим приведенный коэффициент обтекания  $c' = c\varphi$ , где  $c = 1,4$  — коэффициент обтекания для решетчатых ферм;  $\varphi = 0,30 \div 0,35$  — коэффициент заполнения фермы металлоконструкциями.

Равнодействующая скоростного напора ветра на площадку или другую металлоконструкцию

$$P' = \beta c' q F, \quad (102)$$

где  $F$  — площадь вертикальной проекции металлоконструкции, м<sup>2</sup>.

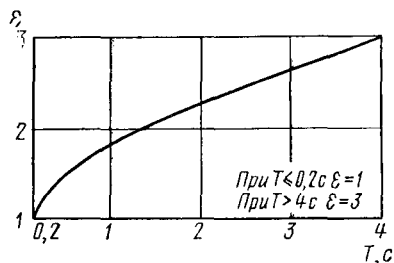


Рис. 143. График для определения коэффициента динамичности

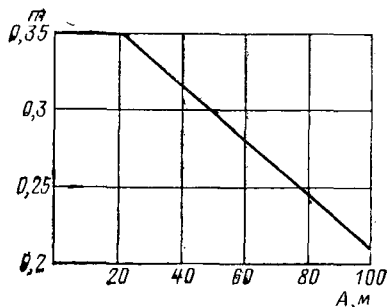


Рис. 144. График для определения коэффициента пульсации

Коэффициент увеличения скоростного напора ветра

$$\beta = 1 + \xi m, \quad (103)$$

где  $\xi$  — коэффициент динамичности, который находят по графику в зависимости от периода собственных колебаний аппарата (рис. 143);  $m$  — коэффициент пульсации скоростного напора ветра, принимают по графику (рис. 144) в зависимости от высоты колонны  $H$ .

Период собственных колебаний цилиндрического аппарата постоянного сечения (с)

$$T = 1,79H \sqrt{\frac{Q_{\max}}{g} \left( \frac{H}{EJ} + 4\varphi_0 \right)}, \quad (104)$$

где  $Q_{\max}$  — максимальный вес аппарата, Н;  $g$  — ускорение силы тяжести, см/с<sup>2</sup>;  $H$  — высота аппарата, см;  $E$  — модуль упругости материала корпуса аппарата, Н/см<sup>2</sup>;  $J = D_{\text{ср}}^3 \cdot (s - c) \pi / 8$  — момент инерции поперечного сечения стенки аппарата; см<sup>4</sup>;  $\varphi_0 = 1 / (c_{\varphi} J_{\varphi})$  — угол поворота опорного сечения;  $c_{\varphi}$  — коэффициент упругого сжатия грунта, который можно ориентировочно принимать 100 Н/см<sup>3</sup>;  $J_{\varphi} = 0,065 D_{\text{в}}^4$  — экваториальный момент инерции площади фундамента, см<sup>4</sup>;  $D_{\text{в}}$  — внешний диаметр кольца опоры, см.

Суммарный ветровой момент определяют как сумму моментов всех равнодействующих сил ветрового давления:

$$M_{\text{вет}} = P_1 h_1 + P_2 h_2 + P_3 h_3 + \dots + P'_1 h'_1 + P'_2 h'_2 + \dots, \quad (105)$$

где  $P_n$  — равнодействующие силы отдельных участков колонны;  $P'_n$  — равнодействующие сил, приложенных к элементам конструкции;  $h_n, h'_n$  — расстояния от расчетного сечения до точки приложения сил.

Рассчитывают следующие сечения: 1) у основания опоры, как самое нагруженное; 2) в месте сопряжения корпуса колонны с кольцевой опорой; 3) по отверстиям, если опора имеет значительные отверстия; 4) в местах переходов с одной толщины на другую, когда толщина стенки колонны меняется по высоте.

Колонны переменного диаметра рассчитывают по той же схеме, но определение периода собственных колебаний в нем несколько осложнено [1, 30].

Напряжения в корпусе колонны от весовых нагрузок

$$\sigma_{\text{сж}} = Q_{\text{max}}/F; \quad (106)$$

от ветрового момента

$$\sigma_{\text{изг}} = M_{\text{вет}}/\omega, \quad (107)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения колонны;  $\omega$  — момент сопротивления сечения.

Для тонкостенного кольцевого сечения с достаточной степенью точности можно считать, что

$$F \approx \pi D_{\text{ср}}(s - c); \quad (108)$$

$$\omega \approx \pi D_{\text{ср}}^2(s - c), \quad (109)$$

где  $D_{\text{ср}}$  — средний диаметр сечения;  $(s - c)$  — толщина стенки за вычетом прибавки на коррозию.

С подветренной стороны сжимающие и изгибающие напряжения суммируются:

$$\sigma = \sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{изг}}. \quad (110)$$

При предварительных расчетах суммарное напряжение не следует допускать более  $80 \div 90 \text{ Н/мм}^2$ .

Если в (110) подставить (106) и (107), то после несложных преобразований получим

$$\sigma = [Q + M_{\text{вет}}/(4D)]/F = Q_{\text{пр}}/F, \quad (111)$$

где  $Q_{\text{пр}} = Q + 4M_{\text{вет}}/D$  — приведенная нагрузка.

Колонны представляют собой тонкостенные конструкции, поэтому их необходимо проверять на устойчивость круглой формы оболочки при совместном действии сжимающей силы и изгибающего момента. Условие устойчивости:

$$Q_{\text{max}}/Q_{\text{доп}} + M_{\text{изг}}/M_{\text{доп}} \leq 1. \quad (112)$$

Здесь допустимая величина осевой нагрузки  $Q_{\text{доп}} = \pi D(s-c) \varphi_c \sigma$ , где понижающий коэффициент

$$\varphi_c = 0,75k_c \left/ \left[ \frac{\sigma_r}{E} \frac{D}{2(s-c)} \right] \right. \text{ при } \frac{D}{2(s-c)} > 0,18 \frac{E}{\sigma_r}$$

$$\text{и } \varphi_c = 1 \left/ \left\{ 1 + 23 \left[ \frac{\sigma_r}{E} \frac{D}{2(s-c)} \right]^2 \right\} \right. \text{ при } \frac{D}{2(s-c)} < 0,18 \frac{E}{\sigma_r}.$$

Изгибающий момент  $M_{\text{доп}} = 0,785k_n ED(s-c)^2$  при  $D/[2(s-c)] \geq 0,23E/\sigma_r$  и  $M_{\text{доп}} = 0,785\varphi_n [\sigma] D^2(s-c)$  при  $D/[2(s-c)] < 0,23E/\sigma_r$ ;  $k_c, k_n$  — коэффициенты, определяемые по табл. 19;

$$\varphi_n = 1 \left/ \left\{ 1 + 15,3 \left[ \frac{\sigma_r}{E} \frac{D}{2(s-c)} \right]^2 \right\} \right.$$

Т а б л и ц а 19

| $\frac{D}{2(s-c)}$ | $0,18E/\sigma_r \div 250$ | 250  | 500  | 750   | 1000  | 1500  | 2000  |
|--------------------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| $k_c$              | 0,14                      | 0,14 | 0,12 | 0,095 | 0,08  | 0,07  | 0,06  |
| $\frac{D}{2(s-c)}$ | $0,23E/\sigma_r \div 250$ | 250  | 500  | 750   | 1000  | 1500  | 2000  |
| $k_n$              | 0,17                      | 0,17 | 0,13 | 0,12  | 0,100 | 0,085 | 0,080 |

Внутреннее давление способствует сохранению круглой формы аппарата, наружное — ухудшает его устойчивость. Если колонна работает под вакуумом, то условие устойчивости принимает вид:

$$Q_{\text{сж}}/Q_{\text{доп}} + M_{\text{изг}}/M_{\text{доп}} + p/p_{\text{доп}} \leq 1, \quad (113)$$

где  $Q_{\text{сж}}$  — сжимающая сила;  $M_{\text{изг}}$  — изгибающий момент;  $p$  — наружное давление;  $p_{\text{доп}}$  — допускаемое наружное давление.

Колонны, установленные в районах с сейсмичностью 7 баллов и более, подлежат расчету на сейсмические воздействия (сейсмические силы считают действующими горизонтально). Аппарат разбивают на участки по высоте, вес каждого из которых принимают сосредоточенным в середине участка. Величина расчетной сейсмической силы на каждом участке

$$s = k_c \eta Q, \quad (114)$$

где  $k_c$  — сейсмический коэффициент, зависящий от сейсмичности района, в котором установлен аппарат; его величины приведены ниже:

Расчетная сейсмичность, бал-

лы ..... 7 8 9  
Коэффициент сейсмичности,  $k_c$  1/40 1/20 1/10

$\beta$  — коэффициент динамичности, зависящий от периода собственных колебаний  $T$  и отношения  $H/D$  (рис. 145);  $Q$  — вес участка;

$$\eta_k = h^2 A / B \quad (115)$$

— коэффициент формы аппарата, учитывающий, что точки, расположенные на разной высоте, имеют неодинаковую амплитуду колебаний и, следовательно, различные ускорения;  $h$  — высота середины расчетного участка;

$$A = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i h_i^2; \quad B = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i h_i^4. \quad (116)$$

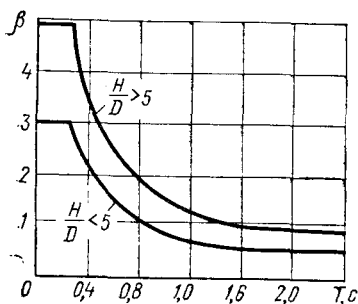


Рис. 145. График к расчету колонны на сейсмическую нагрузку

— соответственно суммы  $Qh^2$  и  $Qh^4$  для всех участков колонны.

Сейсмический момент определяют как сумму моментов отдельных сейсмических сил:

$$M_c = S_1 h_1 + S_2 h_2 + S_3 h_3 + \dots \quad (117)$$

При совместном действии ветровых и сейсмических нагрузок за расчетное принимают наибольшее из двух значений:  $M = M_v$  или  $M = M_c + 0,3 M_v$ .

**Конструирование и расчет опор колонных аппаратов.** Колонные аппараты имеют большой вес, приходящийся на сравнительно небольшую площадь опоры, а колонны, установленные под открытым небом, подвергаются действию ветровых нагрузок, поэтому они имеют массивные нижние кольцевые опоры. На боковые опоры колонны устанавливают редко. Опора состоит из цилиндрической (или конической) обечайки и опорной плиты, имеющей большую толщину (в тяжелых конструкциях — до  $40 \div 60$  мм). Опорную плиту укрепляют вертикальными ребрами жесткости, которые в верхней части обычно связывают сплошным кольцом или отдельными пластинами. Наиболее распространена конструкция, изображенная на рис. 146. Опоры связывают с фундаментом анкерными болтами. Высота кольцевой опоры определяется конструктивными соображениями, иногда она достигает  $10 \div 12$  м. Для доступа внутрь опоры и вывода трубопроводов в корпусе опоры делают отверстия, края которых обязательно укрепляют кольцами жесткости. Опоры колонных аппаратов в настоящее время нормализованы\* их выбирают по двум величинам: максимальной приведенной осевой силе  $Q_{пр \max} = Q_{\max} + M_{изг}/(4D)$ , которая в данном случае определяет удельное давление на опору, и минимальной приведенной осевой силе  $Q_{пр \min} = 4M_{изг}/D - Q_{\min}$ .

\* См. ОСТ 26-467—72 «Опоры цилиндрических вертикальных аппаратов».

Сила  $Q_{\text{пр min}}$  направлена вверх и фактически определяет растягивающие усилия, действующие на фундаментные болты.

Величины  $M_{\text{изг}}$ ;  $Q_{\text{max}}$  и  $Q_{\text{min}}$  определяют у подошвы опоры.

Исходя из допустимого удельного давления на бетонную поверхность фундамента минимальная ширина опорного кольца колонны

$$b = Q_{\text{пр max}} / (\pi D_6 [q]), \quad (118)$$

где  $D_6$  — диаметр окружности фундаментных болтов (предварительно определяется конструктивно);  $[q]$  — допустимое удельное

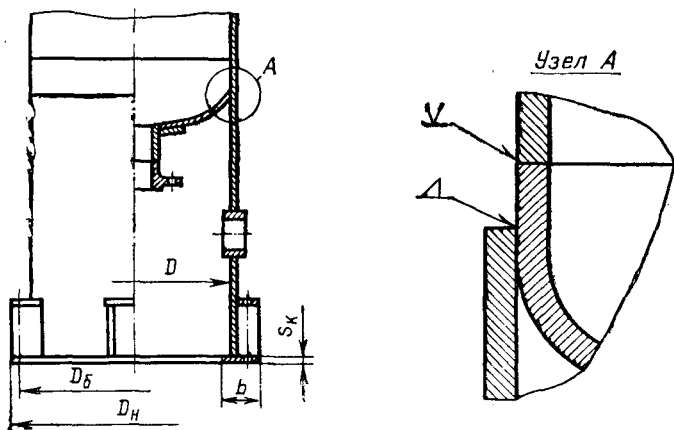


Рис. 146. Кольцевая опора колонны

давление на фундамент, которое в зависимости от марки бетона принимают  $6 \div 10 \text{ Н/мм}^2$ .

Если опорное кольцо не укреплено ребрами жесткости, то

$$s_k = b \sqrt{3q/[\sigma]} + c; \quad (119)$$

где  $q$  — фактическое удельное давление опоры на фундамент, которое определяется из (118) после подстановки в нее фактических размеров опоры. (Расчет опорного кольца, укрепленного ребрами жесткости, см. РТМ-26-Ш-72.)

Диаметр фундаментных болтов

$$d_{\text{вн}} = k \sqrt{M_{\text{изг}}/D_6 + 0,4Q_{\text{min}}/(n[\sigma])} + c, \quad (120)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрузки на болты, определяемый по графику, изображенному на рис. 147;  $n$  — число болтов (обычно  $n$  кратно четырем);  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение для материала болтов.

Независимо от результатов расчета  $d_{\text{вн}} > 25 \text{ мм}$ .

Прибавка на коррозию  $c$  равна  $1 \div 1,5 \text{ мм}$ , допускаемое напряжение для болтов, выполненных из Ст3,  $[\sigma] = 120 \div 140 \text{ Н/мм}^2$ .

**Пример 10.** Произвести прочностный расчет ректификационной колонны (рис. 148), работающей при атмосферном давлении. Диаметр колонны 1600 мм, полная высота с опорой  $H=33$  м, высота кольцевой опоры  $h_1=5$  м. Толщина слоя изоляции — 80 мм. Колонна установлена во II расчетном районе по ветровой нагрузке. Материал колонны Ст3, температура колонны  $100^\circ\text{C}$ . Для обслуживания на высоте  $h_1'=18$ ,  $h_2'=26$  и  $h_3'=31$  м имеются кольцевые площадки.

Весовые характеристики колонны. Их определяют на основании предварительной конструктивной проработки: масса аппарата с площадками 28 000 кг; масса термозащиты 4500 кг; масса воды при гидравлическом испытании 55 200 кг; максимальная масса колонны  $Q_{\max}=87\,700$  кг; минимальная масса колонны

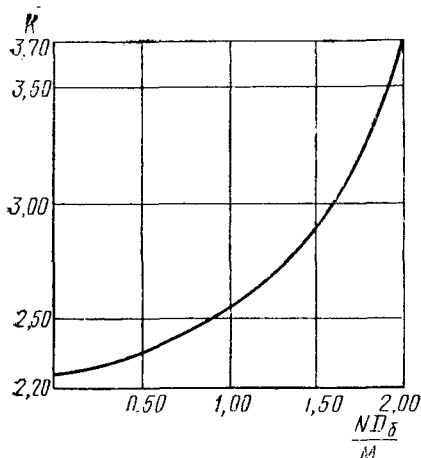


Рис. 147. График к расчету фундаментных болтов

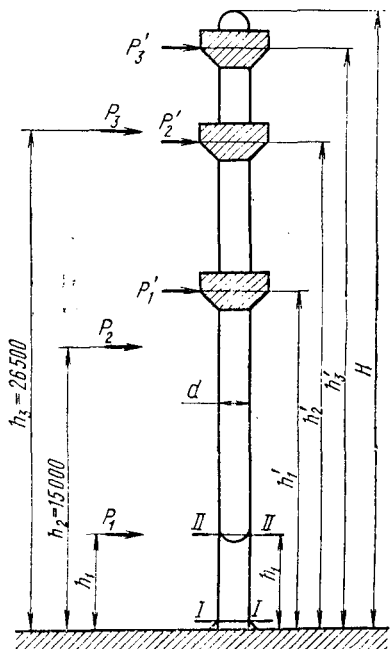


Рис. 148. К расчету колонны

(без тарелок и без жидкости, но со всеми наружными устройствами, создающими ветровой напор)  $Q_{\min}=22\,500$  кг; максимальная масса верхней части колонны выше сечения II—II 26 500 кг.

В данном случае не учитывается масса жидкости, так как она передается непосредственно на опору.

Характеристика сечений колонны. Принимаем толщину опорной обечайки  $s=12$  мм, толщину корпуса колонны  $s_1=100$  мм, прибавку на коррозию  $c=2$  мм.

Площадь поперечного сечения I—I (у основания колонны)  $F_1=\pi D_{cp}(s-c)=3,14 \cdot 1610(12-2)=50\,550 \text{ мм}^2$ .

Момент сопротивления  $w=(\pi/4)D_{cp}^2(s-c)=0,785 \cdot 1610^2(12-2)=2,04 \cdot 10^7 \text{ мм}^3$ .

Момент инерции  $I=(\pi/8)D^3(s-c)=0,392 \cdot 1610^3(12-2)=1,64 \cdot 10^{10} \text{ мм}^4$ .

Сечение II—II (над опорой):

$$F=3,14 \cdot 1608(10-2)=40\,400 \text{ мм}^2.$$

$$W=0,785 \cdot 1608^2(10-2)=1,78 \cdot 10^7 \text{ мм}^3.$$

**Решение.** Определение периода собственных колебаний и коэффициента  $\beta$ .

$$T = 1,79H \sqrt{\frac{Q}{g} \left( \frac{H}{EI} + 4\varphi_0 \right)} = 1,79 \cdot 3300 \times \\ \times \sqrt{\frac{87\,700}{981} \left( \frac{3300}{2,0 \cdot 10^6 \cdot 1,64 \cdot 10^6} + 4 \cdot 0,66 \cdot 10^{-9} \right)} = 3,3 \text{ с},$$

где  $\varphi_0 = 1/(c_\varphi J_\varphi) = 1/(10 \cdot 1,5 \cdot 10^8) = 0,66 \cdot 10^{-9}$ ;  $J_\varphi = 0,065$ ;  $D_{\text{вн}}^4 = 0,065 \cdot 220^4 = 1,5 \cdot 10^8 \text{ см}^4$ ,

где  $D_{\text{вн}} = 220 \text{ см}$  — средний диаметр опоры.

Этому периоду соответствуют коэффициенты динамичности  $\xi = 2,6$  и пульсации  $m = 0,33$ . Отсюда  $\beta = 1 + \xi m = 1 + 2,6 \cdot 0,33 = 1,86$ .

Расчет ветрового момента. Разбиваем колонну по высоте на три расчетных участка, тогда равнодействующие ветровых нагрузок на эти участки:

$$P_1 = \beta c q_1 H_1 D = 1,86 \cdot 0,6 \cdot 350 \cdot 10 \cdot 1,78 = 7000 \text{ Н};$$

$$P_2 = \beta c q_2 H_2 D = 1,86 \cdot 0,6 \cdot 420 \cdot 10 \cdot 1,78 = 8300 \text{ Н};$$

$$P_3 = \beta c q_3 H_3 D = 1,86 \cdot 0,6 \cdot 545 \cdot 13 \cdot 1,78 = 14\,200 \text{ Н};$$

равнодействующие нагрузок на площадки:

$$P'_1 = \beta c' q'_1 F_1 = 1,86 \cdot 0,5 \cdot 490 \cdot 7 = 3200 \text{ Н};$$

$$P'_2 = \beta c' q'_2 F_2 = 1,86 \cdot 0,5 \cdot 525 \cdot 7 = 3400 \text{ Н};$$

$$P'_3 = \beta c' q'_3 F_3 = 1,86 \cdot 0,5 \cdot 535 \cdot 7 = 3440 \text{ Н},$$

где  $q$  — значения ветрового напора для соответствующих высот над уровнем земли,  $\text{Н/м}^2$  (определяется по табл. 21):  $D$  — наружный диаметр колонны с учетом изоляции;  $c' = c\varphi = 1,4 \cdot 0,36 = 0,5$  — приведенный аэродинамический коэффициент для металлоконструкций с коэффициентом заполнения фермы  $\varphi = 0,36$ ;  $F$  — площадь вертикальной проекции, одинаковая для всех трех площадок (рис. 148).

У основания колонны (сечение I—I) ветровой момент

$$M_1 = P_1 h_1 + P_2 h_2 + P_3 h_3 + P'_1 h'_1 + P'_2 h'_2 + P'_3 h'_3 = 7000 \cdot 5 + 8300 \cdot 15 + \\ + 14\,200 \cdot 26,5 + 3200 \cdot 18 + 3400 \cdot 26 + 3440 \cdot 31 = 0,78 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Относительно сечения II—II ветровой момент

$$M_2 = 3400 \cdot 2,5 + 8300 \cdot 10 + 14\,200 \cdot 21,5 + 3200 \cdot 13 + 3400 \cdot 21 + 3440 \cdot 26 = \\ = 0,605 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчет сечений на устойчивость.

Рассчитываем сечение I—I: отношение  $D/[2(s-c)] = 1610/[2(12-2)] = 80,5 < 0,18 < 0,23 E/\sigma_T$ , где для Ст3 при  $100^\circ \text{С}$   $E = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_T = 200 \text{ Н/мм}^2$ ;

$$\varphi_c = \frac{1}{1 + 23 \left[ \frac{\sigma_T}{E} \frac{D}{2(s-c)} \right]^2} = \frac{1}{1 + 23 \left[ \frac{200}{2 \cdot 10^5} \cdot \frac{1610}{2(12-2)} \right]^2} = 0,88;$$

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{1}{1 + 15,3 \left[ \frac{\sigma_T}{E} \frac{D}{2(s-c)} \right]^2} = \frac{1}{1 + 15,3 \left[ \frac{200}{2 \cdot 10^5} \cdot \frac{1610}{2(18-2)} \right]^2} = 0,91;$$

$$Q_{\text{дон}} = \pi D (s - c) \varphi_c [\sigma] = 3,14 \cdot 1610 (12 - 2) 0,88 \cdot 134 = 6,0 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$M_{\text{дон}} = \left( \frac{\pi}{14} \right) D^2 (s - c) \varphi_{\text{и}} [\sigma] = 0,785 \cdot 0,91 \cdot 1610^2 (12 - 10) 1340 = \\ = 2,44 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$Q/Q_{\text{дон}} + M/M_{\text{дон}} = 0,877 \cdot 10^6 / (6,0 \cdot 10^6) + 0,78 \cdot 10^9 / (2,44 \cdot 10^9) = 0,465 < 1,0.$$

Условия устойчивости удовлетворяются.

Расчет опоры. Определяем приведенные нагрузки:

$$Q_{\text{пр max}} = Q_{\text{max}} + 4M_1/D = 0,877 \cdot 10^6 + 4 \cdot 0,78 \cdot 10^9 / 1610 = 2,52 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$Q_{\text{пр min}} = 4M_1/D - Q_{\text{min}} = 4 \cdot 0,78 \cdot 10^9 / 1610 - 0,225 \cdot 10^6 = 1,70 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

по ОСТ 26-467—72 выбираем опору 3-250-200-6000, что означает: опора тип 3 (цилиндрическая), максимальная приведенная нагрузка  $2,50 \cdot 10^6 \text{ Н}$ , минимальная  $2,0 \cdot 10^6 \text{ Н}$ , высота опоры 6 м. Тогда размеры опоры следующие: наружный диаметр 1800 мм; диаметр болтовой окружности 1760 мм; число болтов 16; толщина опорного кольца 30 мм.

Производим поверочный расчет опоры: ширина опорного кольца расчетная

$$b = Q_{\text{пр max}} / (\pi D_6 [q]) = 2,52 \cdot 10^6 / (3,14 \cdot 1760 \cdot 8,0) = 5,6 \text{ мм},$$

где  $[q]_{\text{пр max}} = 8 \text{ Н/мм}^2$ ;

фактическая — 140 мм; фактическое удельное давление  $q = 3,2 \text{ Н/мм}^2$ .

Толщина опорного кольца расчетная

$$s_k = b \sqrt{3q/[\sigma]} + c = 140 \sqrt{3 \cdot 3,2 / 1320} + 0,2 = 14 \text{ мм};$$

фактическая — 30 мм.

Диаметр болта

$$d_{\text{бн}} = k \sqrt{(M_{\text{изг}}/D_6 + 0,4Q_{\text{min}})/(\pi[\sigma]) + c} = \\ = 3,7 \sqrt{(0,78 \cdot 10^9 / 1760 - 0,4 \cdot 0,225 \cdot 10^6) / (16 \cdot 40) + 0,1} = 47,4 \text{ мм};$$

принимая к установке болты М56.

## ГЛАВА 7

### АППАРАТЫ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ

#### § 7.1. Классификация машин и аппаратов для обработки твердых и пастообразных продуктов

В твердой фазе проводят тепловые процессы (например, охлаждение и нагрев сыпучих и пастообразных материалов), сушку и сублимацию, в которых теплообмен сочетается с массопередачей, а также обжиг, хлорирование и другие процессы, в которых наряду с химическими реакциями имеют место тепло- и массообмен. Особое положение занимают измельчение, смешение и диспергирование твердых и пастообразных материалов, в результате которых иногда существенно меняются свойства веществ.

Обработка твердых продуктов имеет свои особенности. В твердой фазе тепло- и массообмен идут значительно медленнее, чем в

газе или жидкости, и для их интенсификации необходимо уменьшение размеров частиц и хорошее перемешивание, поэтому материалы, если это возможно, измельчают до пылевидного состояния. Производительность аппаратов для обработки твердых материалов в значительной степени определяется интенсивностью перемешивания и размерами частиц. Для процессов в твердой фазе применяют следующие основные типы аппаратов: вращающиеся барабанные, с псевдоожиженным слоем и перемешивающими лопастями.

В аппаратах барабанного типа материал перемешивается при вращении барабана. Эти аппараты широко применяют для сушки, обжига, кристаллизации, смешения сыпучих материалов и размола. Они имеют иногда весьма значительные размеры. Так, например, вращающиеся цементные печи имеют диаметр до 5 м и длину до 150 м. Аппараты с вращающимися барабанами широко используют благодаря своей универсальности и надежности работы. Их недостаток — громоздкость и сравнительно невысокая производительность на единицу объема.

Аппараты с псевдоожиженным (кипящим) слоем за последнее время получают все более широкое распространение, так как они обеспечивают чрезвычайно высокую производительность; их применяют для самых различных процессов.

Гребковые аппараты различных типов применяют при работе со слипающимися и пастообразными материалами. Необходимо отметить, что обработка таких продуктов представляет особые трудности, так как липкие и пастообразные материалы залепают рабочие элементы машин и аппаратов и в некоторых случаях приходится применять специальные конструкции — самоочищающиеся лопасти и др.

Наряду с перечисленными основными типами аппаратов для обработки твердых веществ применяют вальцовые машины. Их примером могут служить вальцовые сушилки, их основная деталь — полый вращающийся валец, внутрь которого подают пар (или другой теплоноситель). Вальцовые сушилки делают с одним или двумя вальцами. В одновальцовых нагретый валец частично погружен в ванну с пастообразным или жидким материалом. Паста налипает на валец и подсушивается за время полного его оборота. Сухой материал срезается ножом. После сушки на вальце материал содержит еще некоторый процент влаги. Окончательное досушивание производится в шнеках или гребковых сушилках. Аналогичную конструкцию имеют вальцовые кристаллизаторы, состоящие из вальца, охлаждаемого изнутри и погруженного в ванну с насыщенным раствором. Кристаллы, осаждающиеся на поверхности вальца, срезаются ножом.

Двухвальцовые сушилки имеют два вращающихся навстречу друг другу вальца. Жидкий или пастообразный материал подают на них сверху. Теплоносители или холодоагенты вводятся внутрь вальцов через полые цапфы. При обогреве паром конденсат отводят по изогнутой трубке, опущенной до дна вальца, что позволяет почти полностью удалять конденсат из внутренней полости вальца.

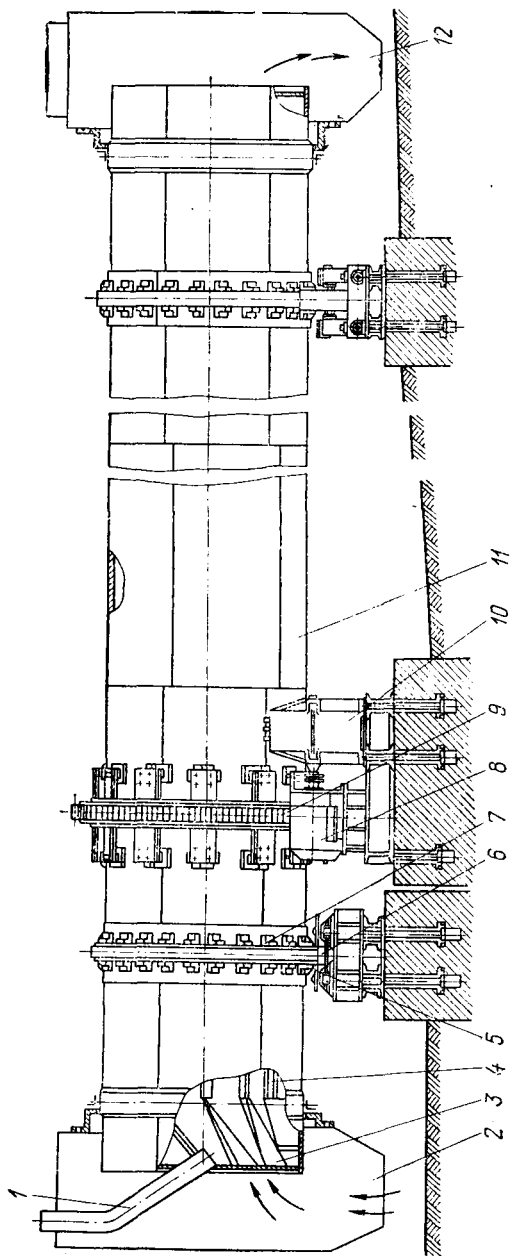


Рис. 149. Барабанная сушилка:

1 — точка; 2 — входная камера; 3 — распределительная насадка; 4 — лопастная насадка; 5 — опорные ролики; 6 — опорные ролики; 7 — бандаж; 8 — мотор; 9 — венцовая шестерня; 10 — разгрузочная камера; 11 — редуктор; 12 — разгрузочная камера

В установках для обработки твердых продуктов очень большое значение имеют не только основные механизмы, но и различные вспомогательные устройства. Например, большие трудности представляет конструирование затворов и уплотнений при работе с сыпучими материалами, особенно на аппаратах под давлением. Большое значение имеют правильный выбор способов загрузки и разгрузки и схемы транспортирования твердых материалов, обеспечение герметичности при работе с пылевидными материалами, газоочистки и др.

## § 7.2. Вращающиеся барабанные аппараты

Конструкция барабанных аппаратов. Основная часть аппарата — барабан, установленный горизонтально или наклонно под небольшим углом к горизонту (не более  $4^\circ$ ). Барабаны без рубашек и футеровки используют в барабанных сушилках, работающих при невысоких температурах, холодильниках

и кристаллизаторах с воздушным охлаждением. Барабаны с рубашкой находят применение в кристаллизаторах с водяным охлаждением. Барабаны, футерованные изнутри огнеупорным кирпичом, применяют в печах, работающих при высоких температурах. На корпусе барабана крепят специальные бандажы, которые передают нагрузку от веса барабана на ролики опорных станций, на одной из которых устанавливают упорные ролики, не допускающие осевого перемещения барабана. Вращение передается от мотора к барабану через шестеренную пару, состоящую из венцовой шестерни, закрепленной на барабане, и малой шестерни, связанной с редуктором. В легких установках применяют цепные или фрикционные передачи. По обоим концам барабана устанавливают камеры для загрузки и выгрузки материала, а также подвода и отвода газа.

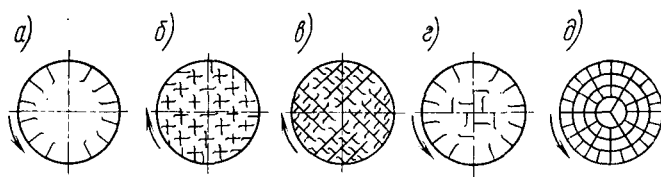


Рис. 150. Типы насадок барабанов

Диаметр барабана  $1,2 \div 2,8$  м, в редких случаях — до  $4 \div 5$  м. Отношение длины к диаметру принимают  $3,5 \div 8$ ; для цементных печей оно может достигать 45.

На рис. 149 показан общий вид барабанной сушилки — одного из наиболее распространенных видов барабанных аппаратов. Сушилка имеет диаметр 2800 мм и длину до 20 м. Она опирается на две роликовые опоры 5, покоящиеся на бетонных фундаментах. Около передней опоры установлена приводная станция. Барабан имеет внутри насадку 3. Горячие газы подаются в сушилку из топki через загрузочную камеру 2. Выход газов и сухого продукта осуществляется через разгрузочную камеру 12. Загружают материал через точку 1. На рисунке видны все основные узлы барабанного аппарата: сам барабан, элемент насадки, опорно-упорная и приводная станция, а также уплотнительные устройства на концах барабана.

Барабаны изготовляют из углеродистой или кислотостойкой стали, толщину листов берут не менее 5 мм, а в больших цементных печах — до  $40 \div 50$  мм. Барабан может быть пустотелым или иметь внутри насадку, способствующую лучшему распределению материала. Выбор насадки зависит от условий процесса и свойств сыпучего материала. Для материалов, не боящихся раскалывания при падении, устанавливают лопастную насадку (рис. 150, а), которая обеспечивает подъем материала и его падение вниз из самой верхней точки подъема. Для зернистых материалов применяют распределительные насадки (рис. 150, б, в, г). Наконец, для мелких пы-

лящих материалов используют перевалочную насадку, состоящую из отдельных ячеек малого сечения, материал в которых пересыпается с малой высоты (рис. 150, д). Насадки собирают из отдельных звеньев длиной около 1 м. Если во время обработки свойства материала меняются по длине барабана, то меняют и тип насадки. Со стороны подачи материала для лучшего питания основной насадки на длине 700÷1200 мм устанавливают винтовую насадку в виде ряда лопастей, расположенных по спирали, далее на некотором участке располагают лопастную насадку, а затем секторную или распределительную.

При обработке спекающихся материалов целесообразно иметь пустотелый барабан. Для сдира- ния корки присохшего материала внутри него закрепляют цепи. Вращающиеся барабаны обычно работают под небольшим разре- жением (5÷25 мм вод. ст.), ко- торое предупреждает выброс вредных и запыленных газов в атмосферу.

Необходимо надежное уплот- нение зазора между вращающим- ся барабаном и неподвижной ка- мерой или концевой головкой, препятствующее подсосу газа в аппарат. Работа узла уплотнения осложняется значительными пе- ремещениями концов барабана и неточной формой его наружной

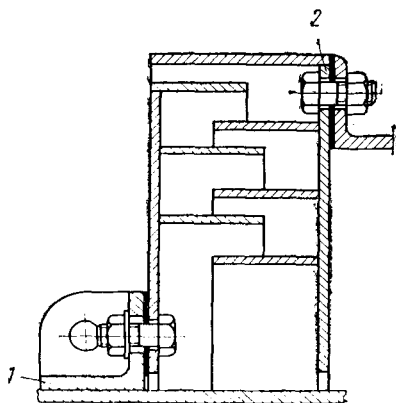


Рис. 151. Осовое лабиринтное уп- лотнение

поверхности. Для вращающихся барабанов применяют лабиринт- ное осевое или радиальное уплотнение. Осовое лабиринтное уплот- нение (рис. 151) состоит из двух элементов — вращающегося сов- местно с барабаном 1 и неподвижного 2. Узкий зигзагообразный зазор (лабиринт между ними) вызывает большое сопротивление движению газа, поэтому практически газы через него не проходят. Радиальные уплотнения допускают свободное радиальное переме- щение концов барабана. Несложное радиальное уплотнение холод- ного конца барабана имеет несколько резиновых секторов, прижи- маемых к вращающемуся барабану с помощью троса, который на- тягивается грузом. На барабанах малого диаметра устанавливают сальниковые уплотнения. Питание вращающихся барабанов произ- водят с помощью течек, проходящих через неподвижные концевые камеры, или шнеков, располагаемых обычно по оси аппарата. Вы- грузжают сыпучий материал через край барабана. При необходи- мости поддерживать постоянный слой материала в барабане дела- ют кольцевые пороги или снабжают его конической горловиной. Опорные ролики принимают на себя нагрузку от всех вращающих- ся частей. Ролики располагают обычно под углом 60° относительно друг друга.

Обычно барабанные аппараты имеют две опоры, но барабаны большой длины делают многоопорными. Расстояние между опорами принимают до 20 м. Для восприятия осевых нагрузок устанавливают упорные ролики. Их располагают так, чтобы они касались боковой поверхности одного из бандажей. Обычно упорные ролики выполняют коническими, чтобы они катались по поверхности бандаж без скольжения (рис. 152). Опорные ролики собирают попарно на общей раме, и узел называют *опорной станцией*. В одной точке опоры на этой же раме устанавливают и пару упорных роликов, тогда узел называют *опорно-упорной станцией* (рис. 153). Опорные ролики требуют очень точной регулировки. При перекосе всего на  $20 \div 30'$  начинается осевое смещение барабана, которое регулируют с помощью установочных винтов.

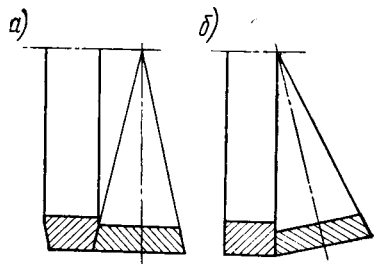


Рис. 152. Геометрия упорных роликов:

а — ролик с вертикальной осью; б — ролик с наклонной осью

Нагрузка от барабана на ролики передается с помощью бандажей, представляющих собой кольца прямоугольного или коробчатого сечения. При небольших размерах барабана бандаж насажи-

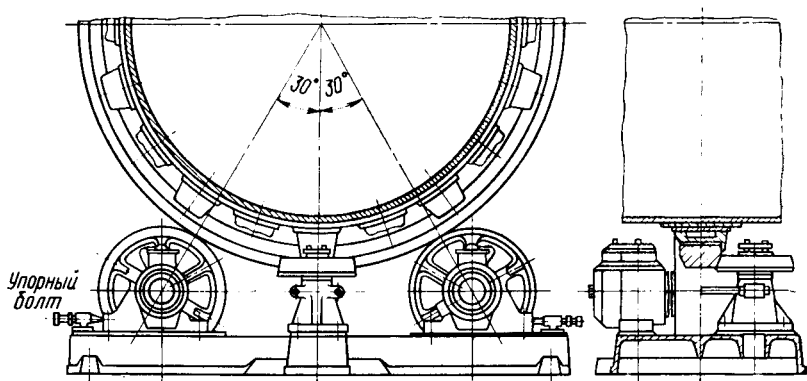


Рис. 153. Опорно-упорная станция

вают в горячем виде или крепят к фланцу барабана. В барабанах большого диаметра широко применяют соединение, показанное на рис. 154, в котором бандаж устанавливают на чугунные башмаки с головками, повернутыми в разные стороны, во избежание осевого смещения бандаж.

Известны два вида крепления венцовой шестерни к барабану: жесткое и упругое. Жесткое крепление используют у барабанов, температура которых во время работы изменяется незначительно и,

следовательно, отсутствуют температурные напряжения. На рис. 155 показано упругое соединение, в котором венцовую шестерню устанавливают на 12÷24 упругих полосы, опирающиеся на подкладки, набранные из стальных пластин. Венцовые шестерни небольших барабанов изготовляют из чугуна, а у тяжелых барабанов — из качественной углеродистой стали. Замена шестерен — дело очень

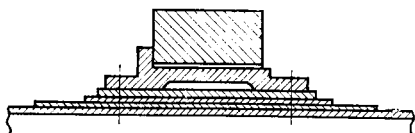


Рис. 154. Установка бандажей на чугунные башмаки

сложное. Чтобы обеспечить долговечность, их изготовляют из более твердого материала, чем малые приводные, замена которых не представляет особых трудностей. Шестерни больших размеров собирают из нескольких секторов.

**Расчет вращающихся барабанов [21].** Объем барабана и его основные геометрические размеры зависят от времени пребывания материала в аппарате, насыпного веса материала и коэффициента заполнения барабана. Число оборотов в минуту

$$n = 4 \div 8 / \sqrt{D}, \quad (121)$$

где  $D$  — диаметр барабана, м.

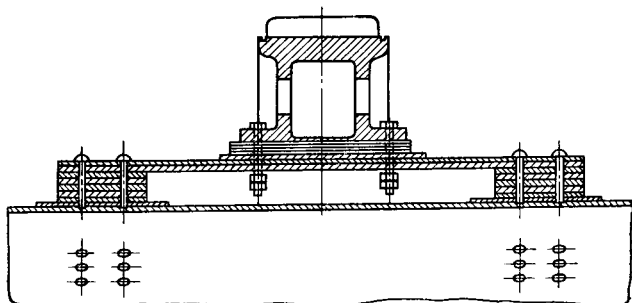


Рис. 155. Упругое крепление венцовой шестерни на барабане

Окружная скорость барабанов обычно не превышает 1 м/с. Мощность привода барабана

$$N = 0,34 \cdot 10^3 D^3 L n \gamma \beta K, \quad (122)$$

где  $L$  — длина барабана, м;  $\gamma$  — насыпная масса материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  — коэффициент заполнения, принимаемый для сушильных печей 0,1÷0,2; для барабанных сит и грохотов 0,01;  $K$  — коэффициент, учитывающий свойства насадки (для гладких барабанов  $K=1$ ; для барабанов с лопастными насадками  $K=1,5 \div 1,6$ ; с распределительными насадками  $K=0,7 \div 0,8$ ; с перевалочной насадкой  $K=0,3 \div 0,4$ ).

Мощность двигателя выбирают с учетом коэффициента полезного действия привода и пусковых нагрузок:

$$N_{\text{дв}} = (1,1 \div 1,3) N / \eta. \quad (123)$$

Для тяжелых барабанов берут меньшее значение, для легких — большее. Определив мощность, находят крутящий момент и рассчитывают привод.

По эмпирической формуле и каталожным данным с последующей проверкой выбирают толщину стенки барабана  $S = (0,007 \div 0,011) D$ .

Корпус барабана проверяют на совместное действие изгибающего и крутящего моментов. Барабаны с бандажами, расположенными по краям, рассчитывают как балку на двух опорах, нагруженную распределенной нагрузкой. Максимальный изгибающий момент в середине барабана

$$M_{\text{изг}} = PL/8, \quad (124)$$

где  $P$  — вес барабана с внутренними устройствами, футеровкой и загружаемым материалом, Н.

Если опоры расположены не у самых краев барабана, то расстояние между ними  $l = 0,586L$ , так как в этом случае изгибающий момент будет минимальным:

$$M_{\text{изг}} = PL/47. \quad (125)$$

Крутящий момент (Н·м)

$$M_{\text{кр}} = 9760 N / n, \quad (126)$$

приведенный момент

$$M = 0,35 M_{\text{изг}} + 0,65 \sqrt{M_{\text{изг}}^2 + M_{\text{кр}}^2}. \quad (127)$$

Момент сопротивления поперечного сечения барабана  $\omega \approx \pi D^2 s / 4$ .

Окончательное условие прочности  $\sigma = M / \omega \leq [\sigma]$ , где  $\sigma$  — допускаемое напряжение в стенке барабана.

Затем проверяют барабан на допускаемый прогиб. Для правильной работы необходимо, чтобы прогиб, отнесенный к 1 м длины, был не более 0,3 мм. В расположении опор по концам барабана под действием равномерно распределенной силы прогиб

$$f = \frac{5}{384} \frac{PL^4}{EJ}, \quad (128)$$

где  $E$  — модуль упругости, Н/мм<sup>2</sup>;  $J$  — момент инерции, мм<sup>4</sup>.

Точный расчет бандажей на прочность довольно сложен. Упрощенный поверочный расчет бандажа, закрепленного башмаками,

производят по формуле

$$\sigma = M_{\max} \omega \leq [\sigma], \quad (129)$$

где  $M_{\max} = Rl/4$ ;

$$R = P/(n \cos \varphi) \quad (130)$$

— реакция опорного ролика;  $l$  — расстояние между башмаками;  $b$  — ширина бандажа;  $h$  — высота бандажа;  $n$  — число роликов, поддерживающих барабан;  $\varphi$  — угол между вертикальной осью барабана и осью ролика.

Для бандажа прямоугольного сечения момент сопротивления  $\omega = bh^2/6$ .

Реакцию ролика  $R$  (рис. 156) раскладывают на две составляющие: вертикальную силу  $N$ , численно равную весу барабана с насадкой, действующему на одну опору, и горизонтальную, распорную силу  $T$ . Чем больше угол  $\varphi$  между роликами, тем больше реакция  $R$  и горизонтальная сила  $T$ .

Ширина бандажа

$$b \geq R/K, \quad (131)$$

где  $R$  — реакция ролика, Н;  $K$  — величина, определяемая опытным путем (для углеродистой стали  $K = 20\,000$ ).

Ширину ролика принимают на 25—30 мм больше ширины бандажа.

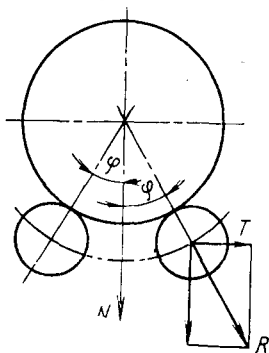


Рис. 156. Эскиз к определению усилий, действующих на ролики

### § 7.3. Аппараты с псевдооживленным слоем

Аппараты с псевдооживленным слоем сейчас широко применяют. Они имеют следующие основные преимущества [8, 18]: 1) интенсивное перемешивание твердой фазы, приводящие к практически полному выравниванию температуры во всем объеме аппарата; 2) высокие коэффициенты теплоотдачи от слоя к газовой фазе и от слоя к теплообменным поверхностям, позволяющие осуществлять в аппаратах с псевдооживленным слоем процессы с высокой тепловой нагрузкой; 3) подвижность псевдооживленного слоя, позволяющая осуществить непрерывный процесс при переработке твердой фазы; 4) сравнительно простое устройство.

Наряду с перечисленными преимуществами процесс псевдооживления имеет и свои недостатки и особенности: невозможность противотока фаз в пределах одного слоя вследствие интенсивного перемешивания, неравномерность пребывания твердых частиц и газовой фазы, необходимость устройства систем пылеулавливания, ограничение скоростей газа интервалом допустимых скоростей псевдооживления. Значительные трудности встречаются при обработке в псевдооживленном слое слипающихся или механически непрочных продуктов.

По технологическому назначению процессы в псевдооживленном

слое можно разделить на три группы: 1) процессы, проходящие в твердой фазе (сушка, обжиг, охлаждение сыпучего материала и др.); 2) процессы, проходящие в газовой фазе (контактно-каталитические процессы в псевдооживленном слое катализатора); 3) процессы одновременного превращения двух фаз, например, десублимация в псевдооживленном слое, обжиг серосодержащих руд. Односекционные аппараты (рис. 157, а) псевдооживленного слоя работают, как правило, непрерывно, имеются, однако, и периодически действующие установки, например сушилки для малотоннажных продуктов (рис. 157, б). Когда хотят обеспечить проток между твердой и газообразной фазами, применяют многосекционные аппараты с перетеканием сыпучего продукта с одной секции на другую (рис. 157, в).

Аппараты с псевдооживленным слоем представляют собой камеру с газораспределительной решеткой в нижней части, снабженную устройствами для приема и выгрузки сыпучих продуктов, теплообменными элементами и другими различными приспособлениями. Как правило, камеры бывают круглой формы, но делают и прямоугольные аппараты с сильно вытянутой формой. Различают аппараты цилиндрические (рис. 158, а), конические (рис. 158, б) и цилиндрикоконические (рис. 158, в). Применение конических аппаратов, расширяющихся кверху, позволяет во многих случаях существенно снизить унос твердых продуктов из слоя, так как скорость газа в верхней части аппарата резко снижается. Площадь поперечного сечения камеры определяют исходя из расчетной скорости газа (ожижающего агента) и его расхода. Высоту псевдооживленного слоя определяют исходя из времени пребывания частиц в слое или времени прохождения газа через слой, а иногда — из условий размещения в слое теплообменных элементов.

Минимальная высота, обеспечивающая устойчивую работу аппарата, 200÷300 мм, максимальная высота ограничивается сопротивлением слоя. На практике применяют псевдооживленные слои высотой 3÷4 м и более. Над слоем должно быть свободное секционное пространство, высота которого для промышленных аппаратов  $\geq 1 \div 2D$ .

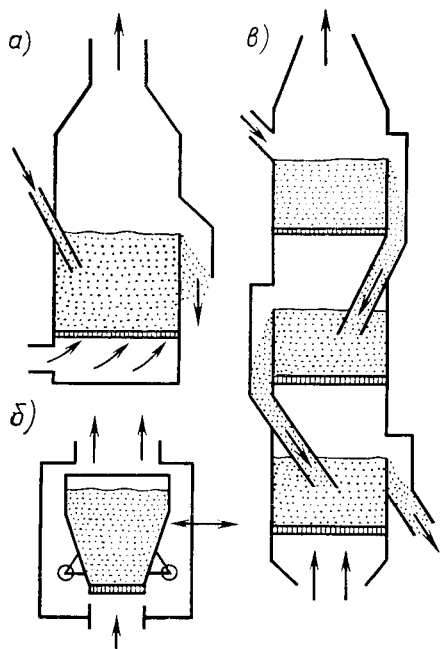


Рис. 157. Схема аппаратов с псевдооживленным слоем

Материал камеры определяется параметрами процесса и свойствами продукта. Как правило, аппараты с псевдоожженным слоем изготавливают из углеродистой и кислотостойкой стали, но для высокотемпературных процессов применяют камеры, футерованные огнеупорами. Наиболее ответственные элементы аппарата с псевдоожженным слоем — газораспределительные устройства, так как от их конструкции в значительной степени зависит характер и размеры образующихся пузырей и застойных зон, т. е. качество псевдоожжения.

Распределительные устройства должны обеспечивать равномерное распределение газа по сечению аппарата, иметь небольшое гидравлическое сопротивление, быть простыми по конструкции, доступными для осмотра и надежными в работе. На практике все эти требования не всегда возможно совместить.

Характер распределения в значительной степени зависит от числа точек ввода газа на единицу поверхности решетки, скорости и направления потоков газа в местах ввода в слой и сопротивления решетки. Конструкции газораспределителей в промышленных аппаратах весьма разнообразны: 1) неподвижные решетчатые устройства, к которым относятся перфорированные решетки с круглыми, направленными перпендикулярно (рис. 159, а), или щелевидными косыми отверстиями (рис. 159, б); пористые решетки (рис. 159, в), составленные из керамических или металлокерамических плит, колпачковые решетки (рис. 159, г) и колосниковые ре-

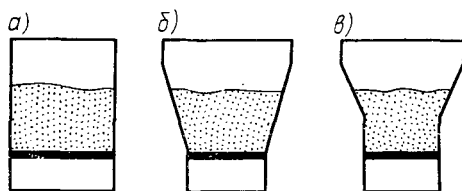


Рис. 158. Формы камер аппаратов с псевдоожженным слоем

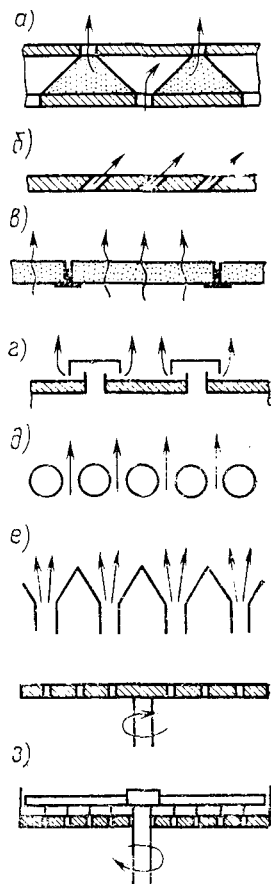


Рис. 159. Основные типы газораспределительных устройств

шетки (рис. 159, д), набранные из ряда полос или параллельных труб; 2) безрешетчатые устройства, к которым относятся диффузоры (рис. 159, е) или распределители в виде барботеров; 3) распределительные устройства с подвижными элементами: вращающейся

решеткой (рис. 159, ж) с гребковыми устройствами (рис. 159, з) или вибрирующие решетки.

Наиболее равномерное распределение обеспечивают решетки из пористых плит, однако они требуют тщательной подборки пористых элементов с постоянной величиной гидравлического сопротивления. Кроме того, поры быстро забиваются, если газ недостаточно очищен. Колпачки и двойные решетки препятствуют просыпанию материала при прекращении дутья, что имеет большое значение при значительных колебаниях нагрузки по газу и в тех случаях, когда попадание твердой фазы под решетку недопустимо. Распределители, состоящие из нескольких диффузоров, хороши тем, что в них практически отсутствуют застойные зоны в нижней части, однако подача газа всего в нескольких точках часто бывает причиной фонтанирования. Во многих случаях эффективны распределительные устройства с подвижными элементами. Например, вращающиеся перфорированные решетки практически исключают образование застойных зон вследствие того, что отверстия в решетке перемещаются. Гребковая мешалка над решеткой также исключает застойные зоны и улучшает качество псевдооживления. Весьма перспективным считается применение вибрирующих решеток. Как показали последние исследования, вибрация в некоторых случаях существенно улучшает качество псевдооживления.

Теплообменные устройства аппаратов с псевдооживленным слоем выполняют в виде змеевиков или U-образных трубных пучков. Предпочтительно вертикальное расположение теплообменных труб, так как за горизонтальными трубами образуются застойные зоны, что иногда бывает недопустимо. Расстояние между осями для горизонтальных труб  $\geq 2d$ , а для вертикальных —  $d$ .

Находят применение элементы из оребренных труб. Устройство, находящиеся внутри псевдооживленного слоя, должны быть надежно закреплены, так как во время работы аппарата на них действуют значительные усилия. Высоту слоя продукта регулируют с помощью переливных планок, но иногда выгрузку осуществляют из нижней части слоя и уровень поддерживают, регулируя скорость выгрузки материала.

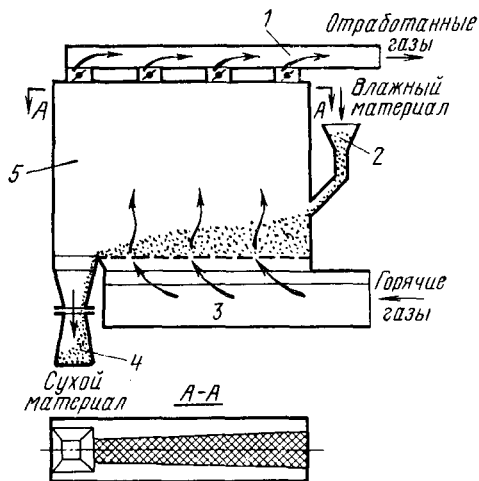


Рис. 160. Сушилка с псевдооживленным слоем, имеющая прямоугольную камеру:

1 — коллектор газа; 2 — решетка; 3 — газораспределительная коробка; 4 — бункер; 5 — камера

На рис. 160 показана схема сушилки непрерывного действия, основная часть которой — прямоугольная камера. С одного конца камеры загружают влажный материал, а сухой ссыпается в бункер на другом конце аппарата. Газ подводится снизу через прямоугольную решетку. Уровень продукта поддерживается регулированием его расхода на выгрузке.

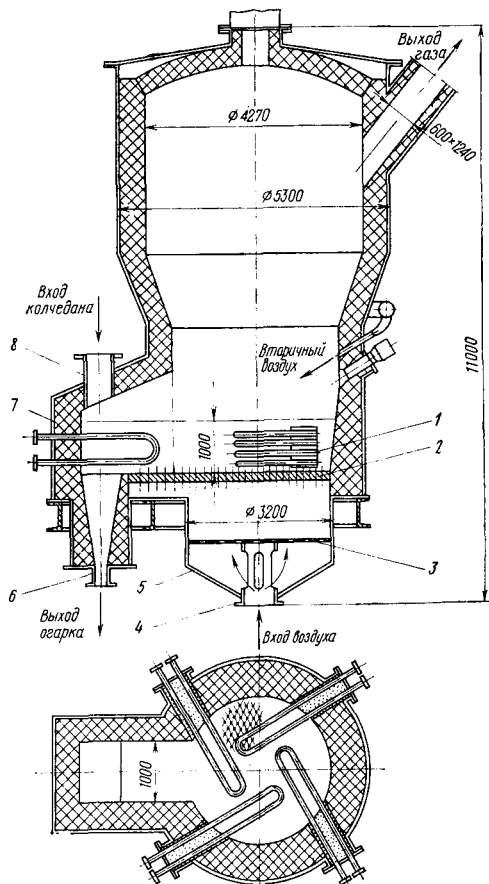


Рис. 161. Печь для обжига колчедана в кипящем слое

На рис. 161 показана печь для обжига колчедана в псевдооживленном слое. Она представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, верхняя часть которого несколько расширена. Полная высота печи 10 м, диаметр в широкой части 5,3 м. Печь имеет стальной кожух, в которую вмонтированы дутьевые сопла, закрытые грибками. Колчедан загружают через окно 8 в верхней части выносной камеры 7, расположенной сбоку печи. Разгрузочное отверстие

б находится в этой же камере напротив окна для разгрузки. Такое близкое расположение загрузочного 8 и разгрузочного 6 отверстий в данном случае допустимо, так как в кипящем слое происходит чрезвычайно быстрое перемешивание материала. Поперек разгрузочного отверстия расположены овальные трубы, по которым движется воздух, поступающий на дутье. Воздух нагревается до  $100 \div 150^\circ \text{C}$  за счет охлаждения огарка. В трубах имеются небольшие отверстия, через них часть воздуха попадает непосредственно в печь. Подогретый воздух подается в распределительную камеру 5 через нижний штуцер 4. Затем он через окно в трубе попадает в распределительную камеру 5, в которой установлена решетка 3, служащая для равномерного распределения потока воздуха. Для охлаждения кипящего слоя установлены четыре водяных охлаждающих элемента 1 с U-образными трубками. Общая поверхность элементов  $14 \text{ м}^2$ . Образующийся пар используют для энергетических целей.

Отдельные типы контактных аппаратов с псевдоожиженным слоем катализатора рассмотрены ниже.

### **§ 7.4. Аппараты с перемешивающими лопастями**

Аппараты с перемешивающими лопастями применяют для обработки сыпучих материалов, но чаще для переработки вязких пастообразных продуктов и веществ, которые в процессе обработки меняют свою консистенцию, например из жидкого состояния переходят в тестообразное, из тестообразного в сыпучее и т. д.

Перемешивание сыпучих и пастообразных материалов имеет свои особенности по сравнению с перемешиванием в жидкой фазе: 1) расход энергии на перемешивание во много раз выше; 2) очень плохое перемешивание по вертикали, поэтому не рекомендуется применять мешалки с вертикальным валом, предпочтительнее аппараты с горизонтальной или наклонной мешалкой, поднимающие материал на определенную высоту (обратно он ссыпается за счет собственного веса); 3) очень легко образуются застойные, непромешиваемые зоны, поэтому лопасти должны ометать весь объем аппарата; 4) перемешивание отдельных участков за счет турбулентного движения среды, которое имеет место в жидкости, а в твердой фазе практически отсутствует.

Иногда применяют двухваловые мешалки или мешалки, совершающие сложное движение. Так как процессы тепло- и массообмена в твердой фазе идут значительно хуже, то всегда возможны местные перегревы, о чем необходимо помнить при конструировании нагревательных устройств.

Лопастные аппараты применяют для сушки, кристаллизации, смешения, выпаривания и некоторых химических процессов. Ниже будет рассмотрено несколько типов этих аппаратов.

Гребковую сушилку (рис. 162) с горизонтальным гребковым валом применяют для сушки сыпучих веществ и пастообразных про-

дуктов, переходящих при сушке в твердое состояние. Аппарат работает как при атмосферном давлении, так и под вакуумом. Эта сушилка периодического действия; продукт загружают через верхний люк 2, а по окончании сушки выгружают через нижний, разгрузочный 5. Перемешивают продукт гребковым валом 1. Осевое перемещение материала происходит за счет наклонной установки гребков на валу. Направление движения материала периодически изменяется за счет реверсирования вращения гребкового вала через каждые 15÷20 мин: с помощью автоматического устройства направление вращения вала меняется и материал попеременно движется к концам сушилки, а затем от концов к центру. В некоторых случаях для лучшего дробления и перетирания материала к мешалкам крепят цепи или в корпус укладывают отрезки труб («скалки»

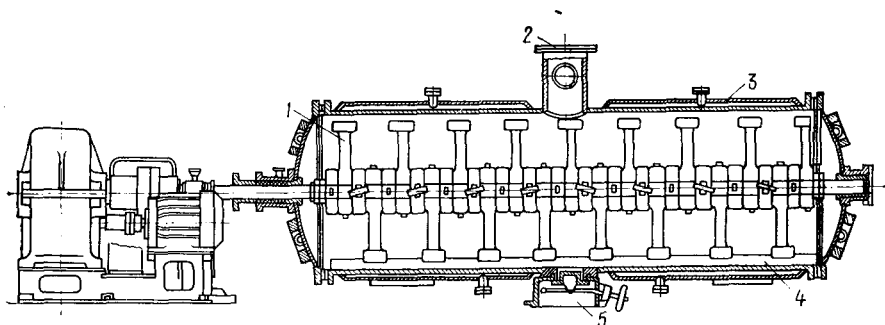


Рис. 162. Вакуум-гребковая сушилка

4), которые свободно перекатываются внутри аппарата. Обогрев осуществляют с помощью рубашки 3. Иногда обогревают и полый вал.

Гребковые сушилки изготовляют различной емкости — от 0,5 до 10 м<sup>3</sup>. По сравнению с более современными типами сушилок производительность их невысока, однако их применяют в малотоннажных производствах благодаря простоте конструкции и возможности работать при глубоком вакууме. Их рабочие поверхности защищают в случае необходимости антикоррозионными покрытиями. Например, в настоящее время осваиваются эмалированные гребковые сушилки, которые могут работать в весьма агрессивных средах. Имеются гребковые сушилки и непрерывного действия, в которых материал перемещается от загрузочного отверстия к разгрузочному, расположенному на противоположном конце. Длина непрерывной гребковой сушилки равна 6÷8 диаметрам.

Аппараты с гребковым валом, расположенным наклонно, применяют в пищевой промышленности, а также в некоторых химических производствах. На рис. 163 показан аппарат для производства ксантогенатов. Аппарат имеет наклонный цилиндрический корпус с эллиптическими днищами, внутри которого расположена якор-

ная мешалка 2. Люки для загрузки и разгрузки расположены соответственно в высшей и низшей точках аппарата. Обогревают (а на отдельных стадиях процесса охлаждают) с помощью рубашек. В аппарате проходит последовательно несколько процессов: сначала химическая реакция образования ксантогенатов, при которой масса загустевает, после этого их выпарка и сушка до порошка. Выбранный тип мешалки (якорная) и ее наклонное положение обеспечивают удовлетворительное перемешивание на всех стадиях процесса. Мешалка имеет переменное число оборотов, к концу про-

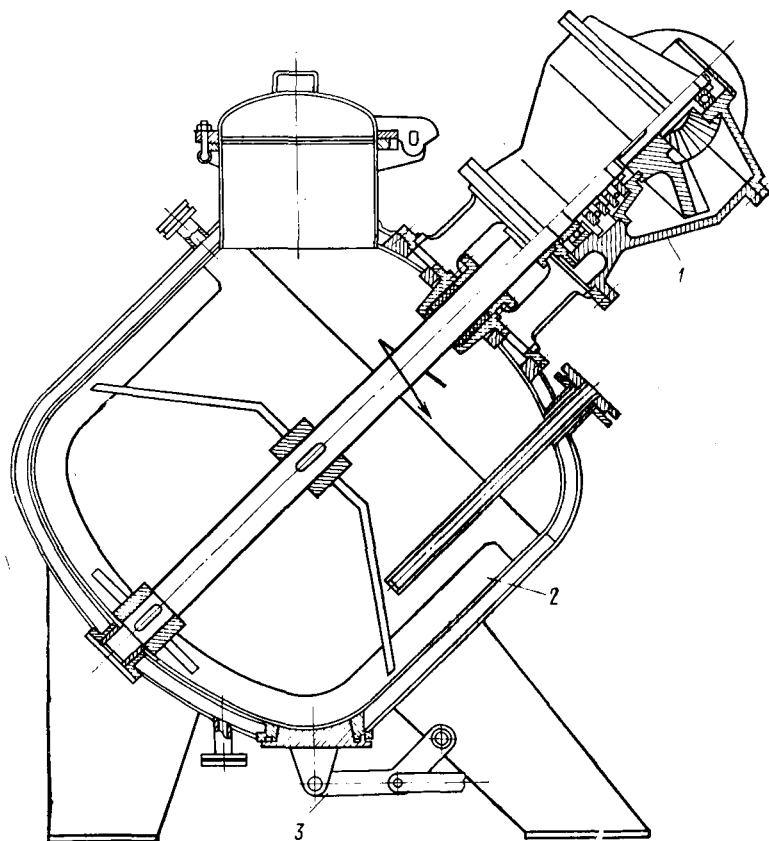


Рис. 163. Ксантогенатор с наклонным валом:  
1 — привод; 2 — якорная мешалка; 3 — разгрузочный клапан

цесса частоту вращения снижают. Аппарат работает при атмосферном давлении, а на стадии выпарки и сушки — под вакуумом. Так как аппарат работает с взрывоопасными веществами, привод выносят за стену.

Для процессов, в ходе которых происходит образование твердой фазы, применяют также аппараты с плоским дном. На рис. 164

показан подобный аппарат — куб исчерпывающей дистилляции производства фталевого ангидрида. Аппарат предназначен для вакуумной отгонки фталевого ангидрида из кубовых остатков. В процессе отгонки продукт загустевает, превращается в вязкую смолоподобную массу, а затем в порошок. Для обогрева к аппарату приваривают рубашки или наружный змеевик. Широкое плоское днище, на котором к концу процесса продукт располагается сравнительно тонким слоем, не требует вертикального перемешивания. Мешалка имеет три тяжелые лопасти, на которых установлены гребки, расположенные таким образом, что они полностью ометают поверхность днища. В других аналогичных конструкциях, например в аппарате для производства сернистых красителей «Фредеркинг», мешалку делают подъемной. Ее поднимают на какой-либо стадии процесса, а затем медленно опускают при одновременном вращении, и мешалка разрыхляет затвердевший продукт.

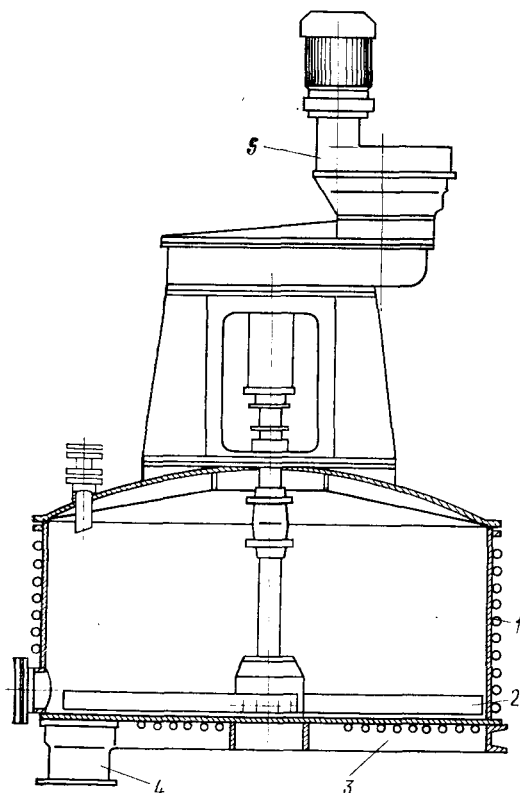


Рис. 164. Куб исчерпывающей дистилляции:  
1 — корпус; 2 — мешалка; 3 — ребра жесткости; 4 —  
разгрузочный клапан; 5 — привод

Для смешения пастообразных материалов, пластификации и перетирания продуктов применяют двухвалковые массомешатели, которые применяют в отраслях

химической промышленности и в промышленности, изготовляющей резину и пластмассы.

На рис. 165 показан универсальный массомешатель с двумя Z-образными лопастными валами, предназначенный для таких технологических операций, как смешение и разминание вязких масс, смешение порошков с жидкостями, и других аналогичных операций. В этом аппарате роторы, отлитые из стали, вращаются навстречу друг другу с разными частотами.

Корпус мешателя имеет рубашку для нагрева и охлаждения. Материал в одних конструкциях разгружают при открытии секции в днище, в других — переворачивают весь корпус.

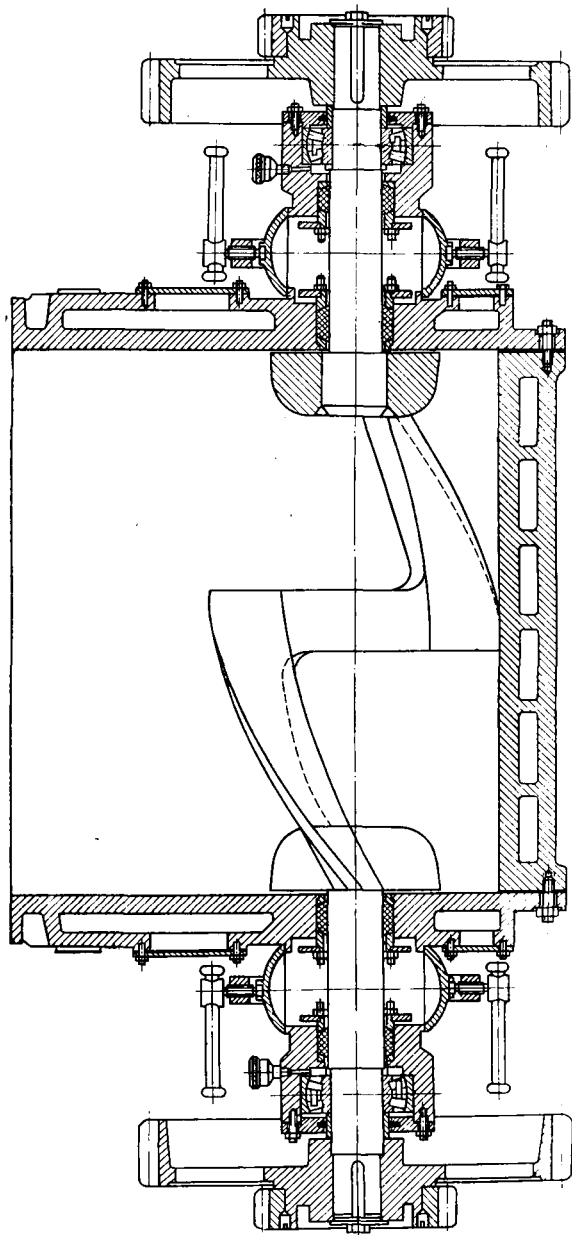


Рис. 165. Продольный разрез двухвалкового массомешателя с Z-образными лопастями

### § 8.1. Основные типы центрифуг

*Центрифугами* называют машины, в центробежном поле которых разделяются неоднородные системы [16, 19]. Обработка веществ в поле центробежных сил, во много раз превосходящем силу тяжести, в некоторых случаях оказывается весьма эффективной, поэтому центрифуги относятся к химическим машинам интенсивного действия. По характеру работы их делят на осадительные и фильтрующие, по принципу действия — на непрерывные и периодические, по способу разгрузки — на центрифуги с ручной и механизированной выгрузкой. Различают центрифуги с вертикальным и горизонтальным ротором. Осадительные центрифуги имеют сплошной ротор, фильтрующие — перфорированный, накрытый фильтрующей тканью. Центрифуги с ручной выгрузкой в настоящее время применяют только в опытных и малотоннажных производствах. В крупных производствах используют центрифуги с механизированной выгрузкой непрерывного действия или периодического действия с автоматическим управлением. Центрифуги с вертикальным ротором имеют нижнюю или верхнюю подвесную опору. В центрифугах с нижней опорой — ручная выгрузка, а в машинах с верхней опорой осадок выгружают через отверстия в дне ротора и его выгрузка может быть механизирована. Все типы горизонтальных центрифуг имеют механизированную разгрузку: центрифуги с ножевым съемом осадка, в которых осадок выгружают на ходу с помощью скребка (ножа); центрифуги с пульсирующей выгрузкой, в которых осадок удаляют на ходу с помощью поршня, совершающего небольшие возвратно-поступательные движения, и осадительные центрифуги со шнековой выгрузкой. Особую группу представляют собой трубчатые центрифуги (сверхцентрифуги), предназначенные для осветления разбавленных суспензий и разделения эмульсий. Такие центрифуги являются быстроходными машинами. Их общий конструктивный признак — наличие узкого трубчатого ротора.

Современные автоматизированные центрифуги — сложные агрегаты, состоящие из следующих основных узлов и систем: ротора с валом — главная рабочая часть центрифуги; кожуха и станины с устройствами для виброизоляции; привода; механизма для удаления осадка; системы гидравлики с автоматическим управлением.

Масляная гидравлическая система служит для приведения в движение различных механизмов центрифуги — ножей, толкателей и др. Она включает в себя ротационный или шестеренчатый насос, масляный бак, приборы управления. В некоторых центрифугах применяют циркуляционную систему смазки подшипников. Приборы управления обычно монтируют на отдельном щитке или колонке, которые могут быть установлены в стороне от центрифуги.

При работе с ядовитыми, летучими или взрывоопасными веществами конструкция центрифуг усложняется, так как требуются

герметичный кожух и герметизация разгрузочных устройств. Центрифуги во взрывоопасном исполнении имеют взрывобезопасные электродвигатели и пусковую аппаратуру, в них не допускается искрообразование при трении или соударении отдельных деталей.

Как правило, современные центрифуги снабжают системой автоматической блокировки, не допускающей их перегрузки, торможения при включенном двигателе, при пуске или открытой крышке.

Роторы центрифуг изготавливают из механически прочных материалов — углеродистой и кислотостойкой стали и титана.

Для работы с сильно корродирующими средами используют центрифуги, защищенные антикоррозионными покрытиями (гуммированные и эмалированные). Одна из наиболее важных характеристик центрифуги — фактор разделения, показывающий, во сколько раз центробежная сила больше силы тяжести. В современных промышленных центрифугах фактор разделения достигает 3000 при числе оборотов до 4000 об/мин.

## § 8.2. Центрифуги с вертикальным валом

Центрифуги с вертикальным валом разделяют на центрифуги с нижней опорой (маятниковые) и центрифуги подвесные с верхним приводом. Корпус маятниковых центрифуг подвешивают на трех пружинных опорах, эта особенность делает ротор самоустанавливающимся, благодаря чему машины становятся нечувствительны к неравномерной загрузке ротора.

Маятниковые машины — самые старые и простейшие в обслуживании центрифуги, они имеют низкую производительность и требуют ручного труда.

На рис. 166 показана вертикальная фильтрующая

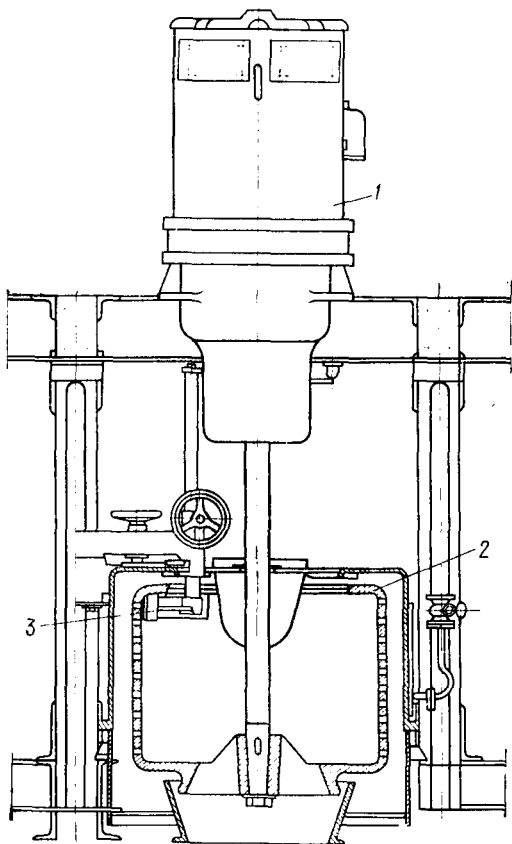


Рис. 166. Вертикальная центрифуга с механизированной выгрузкой

шая центрифуга с нижней механизированной выгрузкой и полуавтоматическим управлением. Ротор 2 центрифуги непосредственно соединен с электродвигателем 1, который имеет три частоты:  $250 \text{ с}^{-1}$  при загрузке,  $750 \text{ с}^{-1}$  при разгоне и фильтрации и  $100 \text{ с}^{-1}$  при выгрузке осадка. Переключаются скорости автоматически с помощью реле времени. Осадок по окончании фильтрации выгружают скребком 3, который крепят к вертикальной штанге, поворачивающейся вместе с ним вокруг оси. Во время выгрузки скребок

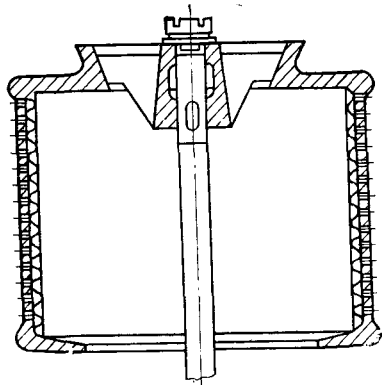


Рис. 167. Ротор вертикальной подвесной центрифуги

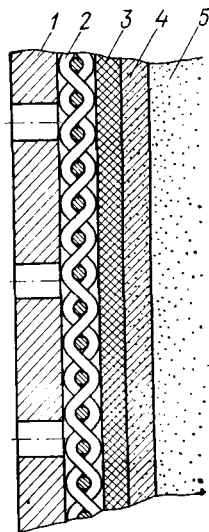


Рис. 168. Укладка фильтрующей ткани на роторе центрифуги:

1 — стенка барабана; 2 — подкладное сито; 3 — ткань; 4 — осадок; 5 — жидкая фаза

управляется вручную. Срезанный осадок выгружают через нижние окна ротора.

В некоторых конструкциях отверстия для выгрузки осадка закрыты конусом, который в момент выгрузки поднимается.

Основная деталь центрифуги — ротор. Его изготавливают сварным. На рис. 167 показан ротор вертикальной центрифуги. Он состоит из ступицы, днища, перфорированной обечайки и крышки.

Диаметр отверстий  $4 \div 8 \text{ мм}$ , толщина обечайки обычно не превышает  $8 \text{ мм}$ . Отверстия располагают в шахматном порядке. На барабан 1 накладывают плетеную сетку (подкладное сито 2), изготовляемую из проволоки диаметром  $1 \div 1,25 \text{ мм}$ ; на сито 2 — фильтровальную ткань 3 (рис. 168). Сетку и ткань прижимают к барабану бандажами.

При изготовлении роторов в антикоррозионном исполнении все детали изготавливают из нержавеющей стали, а ступицу — из угле-

родистой и защищают листовой нержавеющей сталью толщиной 1,5 мм.

Гуммированные роторы применяют при работе со средами, в которых нестойки ни углеродистые, ни кислотостойкие стали. Эти роторы обеспечивают коррозионную стойкость и противостоят абразивному износу. В целом гуммированное покрытие — механически прочное. Гуммируют эбонитом или мягкой резиной. Толщина покрытия составляет  $4 \div 5$  мм. Следует учитывать, что гуммированный слой удовлетворительно работает при окружной скорости, достигающей 24 м/с, а при покрытии только эбонитом — 60 м/с. Трудности представляет защита отверстий в роторе. Края отверстий должны быть закруглены радиусом  $1 \div 2$  мм.

Специфическая особенность центрифуг с верхней опорой (подвесных) — крепление вала на верхнем его конце в шарнирной опоре, допускающей колебания оси вала в пространстве. Расположение опоры выше центра вращающихся масс делает систему устойчивой.

На рис. 169 показан верхний подшипник центрифуги типа ПМ-1200. Привод осуществляется от электродвигателя через элас-

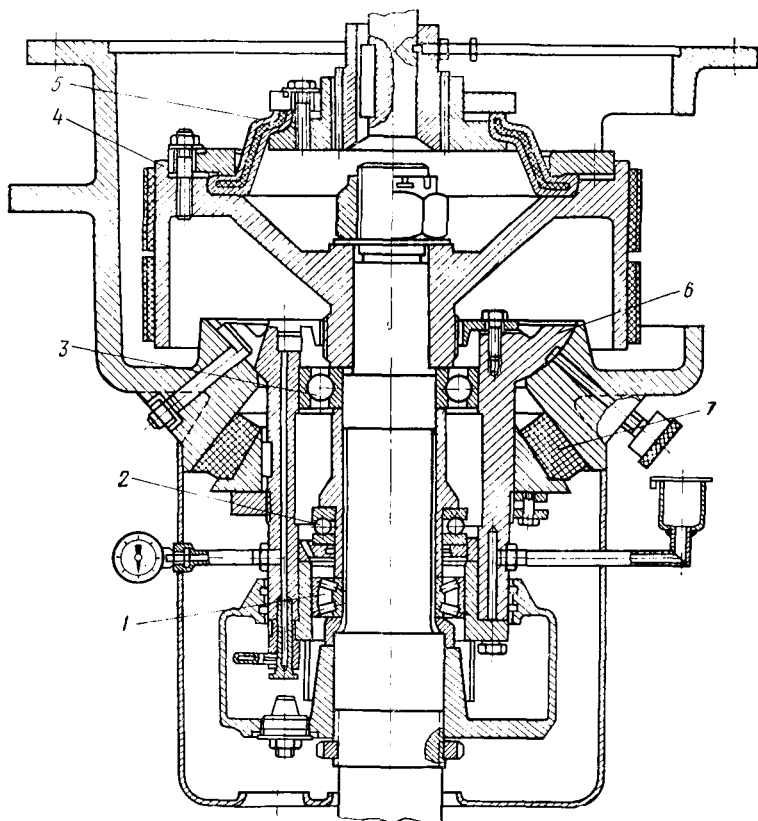


Рис. 169. Опора центрифуги с верхней подвеской

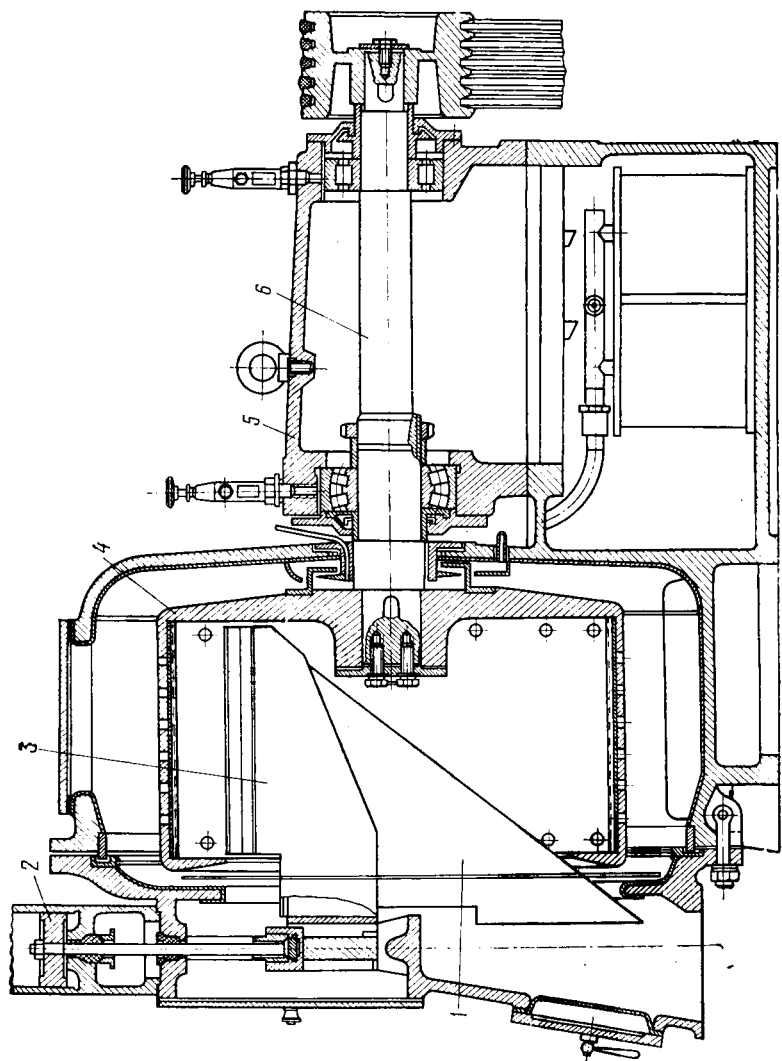


Рис. 170. Центрифуга с ножевой выгрузкой осадка

тичную муфту 5, закрепленную на торозном шкиве 4. Шпиндель смонтирован на двух радиальных подшипниках 13. Осевые усилия воспринимает упорный подшипник 2. Гильза 6, в которой установлены подшипники, имеет в верхней части сферическую поверхность, опирающуюся на корпус. Колебания вала смягчаются резиновыми амортизаторами 7.

### § 8.3. Горизонтальные и трубчатые центрифуги

Горизонтальные центрифуги с ножевой разгрузкой осадка бывают как фильтрующие, так и осадительные.

**Центрифуга с ножевой разгрузкой осадка.** Подается суспензия, фугуется и снимается осадок последовательно. Смена и длительность операции регулируются специальным автоматическим устройством. Нож, срезающий осадок, управляется гидравлическим устройством. При небольшой ширине ротора осадок удаляется по наклонному желобу. Чем больше коэффициент трения осадка по поверхности желоба, тем круче должен быть желоб. При большой ширине ротора осадок выводится с помощью шнека.

Показанная на рис. 170 центрифуга имеет перфорированный ротор, расположенный внутри литого корпуса 5. Ротор 4 крепится на валу 6 с помощью шпонки, вращение вала осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу. Гидроцилиндр 2 двигает нож 3 к поверхности барабана. При подъеме нож срезает осадок, который падает в желоб 1 и выводится по нему наружу. Суспензия подается по трубе со щелевидным окном на участке, расположенном внутри ротора 4. Для подачи суспензии через определенные промежутки времени служит загрузочный клапан с гидравлическим управлением. Центрифуга управляется электрогидравлическим автоматом, отличительная особенность которого — возможность контролировать наполнение центрифуги не по времени, а по толщине слоя осадка.

Описанные центрифуги выпускают двоянными, управляемые двоянным автоматом. В этих машинах рабочие циклы двух сторон ротора выбраны так, чтобы наиболее энергоемкой операции среза одной стороны ротора соответствовала операция фугования другой его стороны. Механизм среза осадка состоит из рамы с укрепленным на ней режущим лезвием и гидравлического цилиндра с поршнем. Рама, связанная со штоком поршня, перемещается по двум вертикальным направляющим колонкам, которые прикреплены к станине центрифуги.

**Центрифуги с пульсирующей разгрузкой осадка.** Практически при непрерывной подаче суспензии в этих машинах осадок выталакивается отдельными порциями с помощью выдвижного днища (рис. 171). Ротор 2 центрифуги консольно закреплен на полом вала. Внутри ротора расположен толкатель 3, который, совершая вращательное и возвратно-поступательное движения, передвигает осадок по щелевидному сити ротора. Толкатель с помощью штока связан с поршнем 1, находящимся в цилиндрической полости, образован-

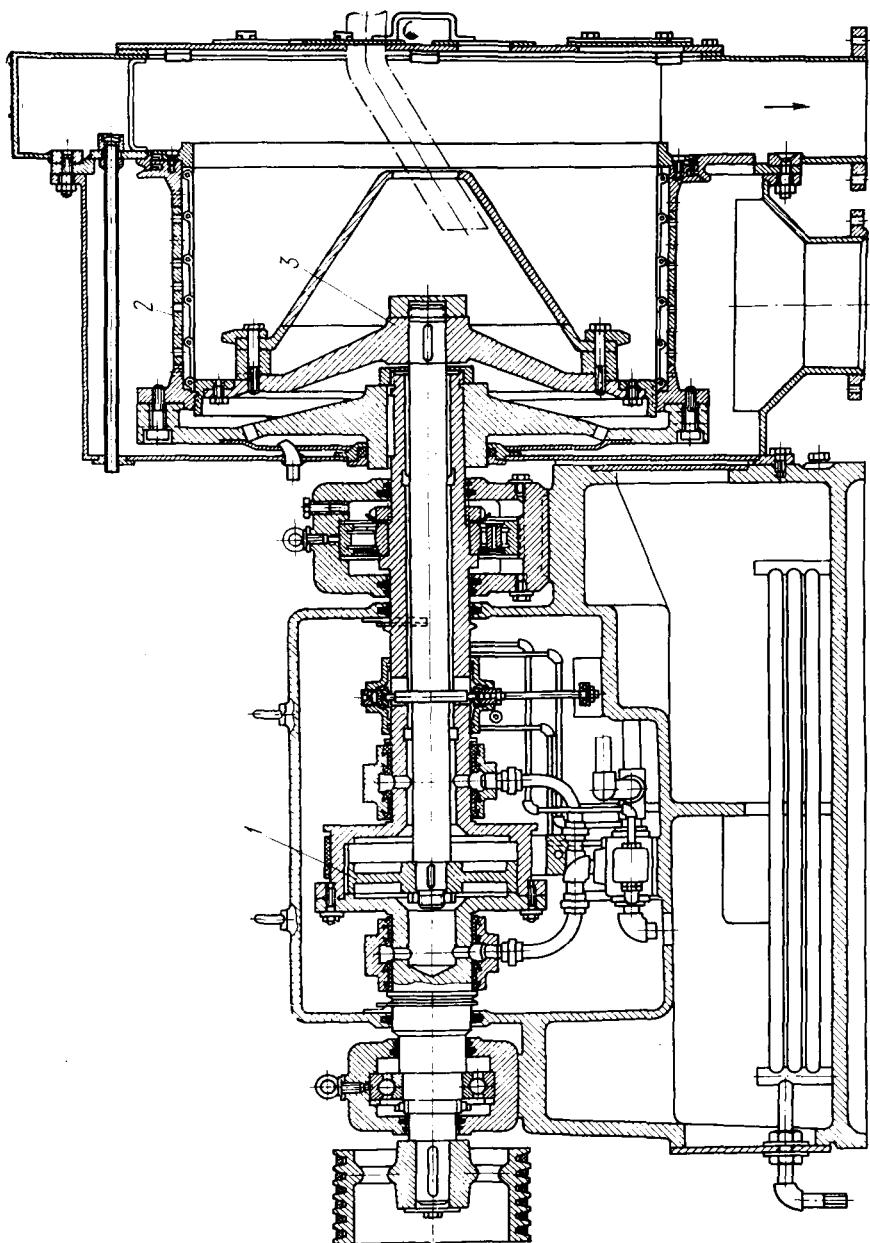


Рис. 171. Центрифуга с пульсирующей выгрузкой осадка

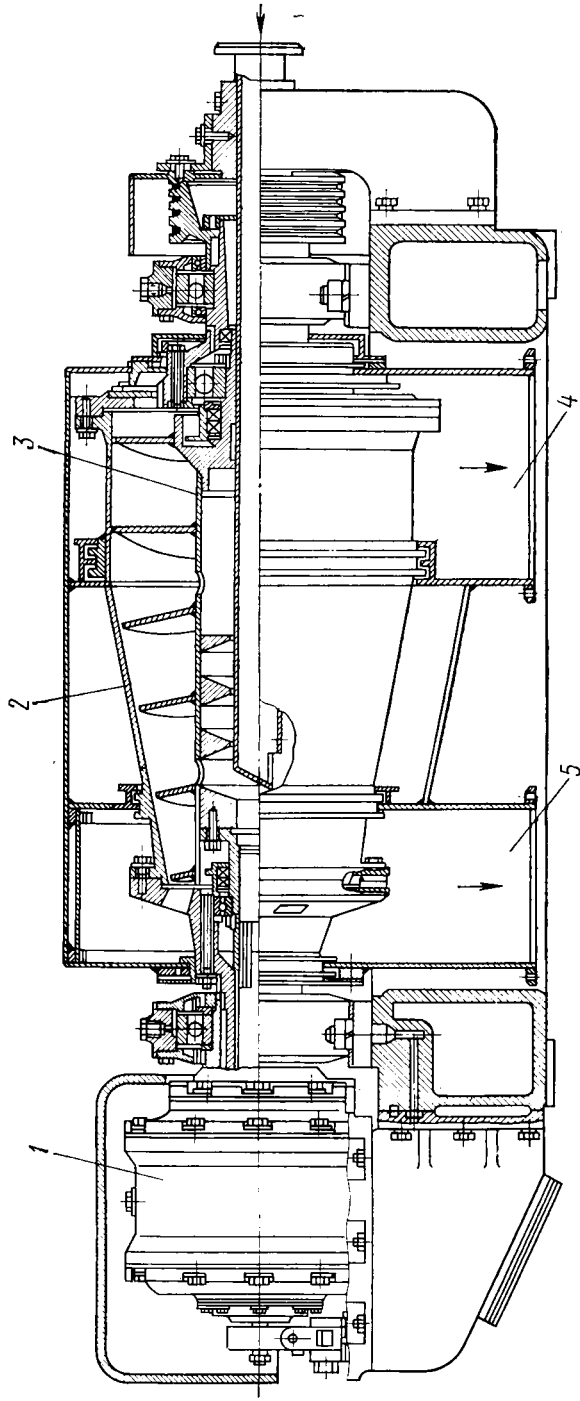


Рис. 172. Осадительная центрифуга со шнековой выгрузкой

ной утолщением задней части вала. Управляют цилиндром с помощью золотника. На станине центрифуги установлен ротационный масляный насос для создания давления масла. Масло в цилиндр вводится через цилиндрические цапфы, закрепленные на валу (в других конструкциях — через торец вала). Суспензия поступает внутрь воронки, в которой постепенно приобретает скорость, почти равную окружной скорости вращающегося ротора. Суспензия выбрасывается через отверстия в опорном кольце. Образующийся осадок по мере накопления продвигается толкателем вперед. Величина хода толкателя составляет  $\frac{1}{10}$  длины ротора и регулируется специальными ограничителями. Число двойных ходов в минуту принимают от 10 до 50. Наибольшая длина ротора центрифуги с пульсирующей выгрузкой связана с минимальной толщиной слоя осадка. Так как чрезмерное увеличение толщины осадка невыгодно, то возможность увеличения длины ротора ограничена. Это обстоятельство привело к созданию многокаскадных центрифуг с пульсирующей выгрузкой, которые имеют ряд телескопически расположенных коротких роторов. Отдельные роторы, совершающие возвратно-поступательные движения в осевом направлении, сконструированы так, что торцовая кромка одного барабана служит толкателем для следующего. Специальный толкатель удаляет осадок только из первой ступени. Число каскадов доходит до четырех. С увеличением числа каскадов улучшается просушка осадка, повышается производительность центрифуги и уменьшается расход энергии на выталкивание осадка.

**Центрифуги со шнековой разгрузкой осадка.** Они имеют конический или цилиндрический ротор, внутри которого расположен барабан, несущий спиральную ленту (шнек). Ротор и шнек вращаются с незначительно отличающимися скоростями. Шнековый барабан несколько отстает от ротора и перемещает осадок. Наиболее распространены осадительные центрифуги со шнековой выгрузкой.

Осадительная центрифуга, показанная на рис. 172, имеет цилиндроконический ротор 2, который приводится во вращение от электродвигателя через клиноременную передачу. Вращение к шнеку 3 от ротора 2 передается через планетарный редуктор 1. Суспензия поступает по центральной трубе в барабан шнека и через отверстия в барабане подается в среднюю его часть. Осадок перемещается шнеком к узкому концу ротора и удаляется через штуцер 5. Осветленная суспензия за счет центробежной силы перемещается к широкой части ротора и удаляется через штуцер 4 в его торцовой стенке. Высота слоя суспензии регулируется пластинками, закрывающими отверстия, через которые удаляется осветленная суспензия. Кинематическая схема данной шнековой центрифуги показана на рис. 173.

Ответственный узел центрифуги — редуктор, служащий для передачи вращения от барабана центрифуги к ее шнеку. Редуктор передает весьма значительные моменты, вызванные окружными усилиями, возникающими между шнеком и барабаном центрифуги во время транспортирования осадка. Консольные роторы горизонталь-

ных центрифуг имеют в принципе такую же конструкцию, что и вертикальных. При малом диаметре их делают цельнолитыми, при больших диаметрах — сварными. Ротор центрифуги с пульсирующей выгрузкой имеет перфорированный барабан, на который уложено

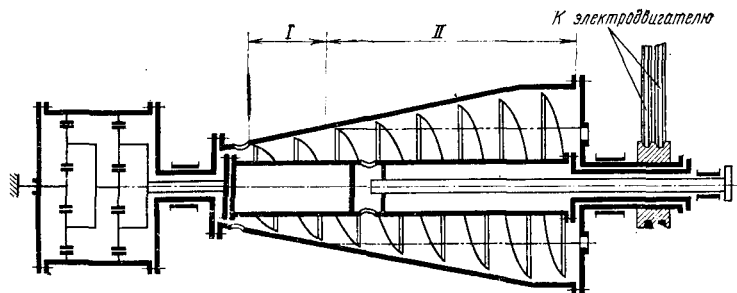


Рис. 173. Кинематическая схема центрифуги со шнековой выгрузкой:

*I* — зона осушки; *II* — зона осаждения

специальное сито со скользящим по нему поршнем толкателя (рис. 174, *а*). Сита (рис. 174, *б*) делают двух типов — листовые и прутковые. Листовые представляют собой тонкие листы, в которых проре-

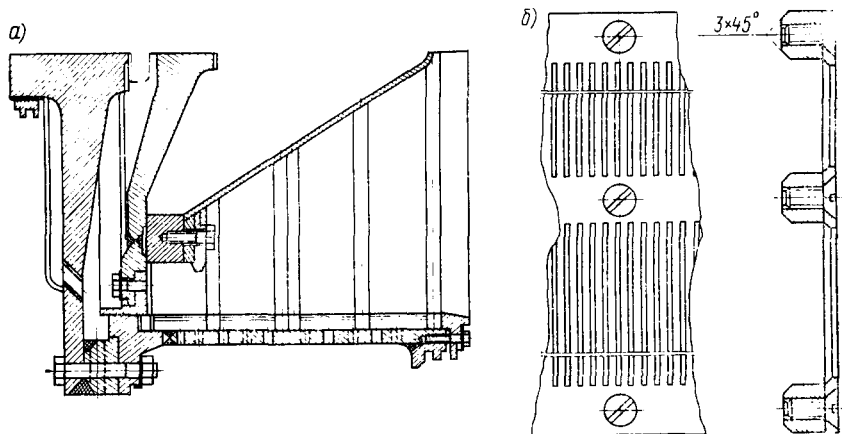


Рис. 174. Узлы ротора центрифуги с пульсирующей выгрузкой

заны щели шириной  $0,25 \div 0,3$  мм, прутковые набирают из специальных прутков, собранных на стяжных болтах.

Роторы отстойных центрифуг со шнековой выгрузкой делают двухопорными. Они имеют малый диаметр при значительной длине. На рис. 175 показан типовой ротор, состоящий из сварной цилиндрико-конической части и обработанных цапф, прикрепленных к ротору винтами. Шнеки для выгрузки осадка представляют собой ци-

линдрическую или коническую трубу, на которую приварены витки из листовой стали.

В горизонтальных центрифугах применяют два варианта расположения опор — с консольным ротором и расположением ротора между опорами. Схема с расположением ротора между опорами лучше с точки зрения распределения нагрузок, однако передняя опора иногда затрудняет разгрузку центрифуги и обслуживание ротора.

В современных центрифугах широко применяют самоустанавливающиеся опоры, обеспечивающие повышенную работоспособность подшипников качения, например корпуса подшипников со сферическими втулками, которые разгружают подшипники от усилий, возникающих при перекосах.

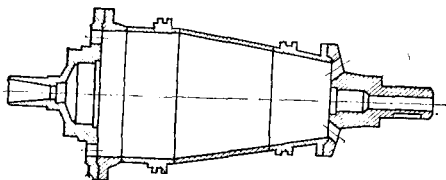


Рис. 175. Сборный цилиндрикоконический ротор

Кожухи центрифуг делают литыми или сварными. Обычно они имеют съемную крышку или несколько люков для доступа к основным узлам. Привод центрифуг осуществляется непосредственно от электро-

двигателя либо через клиноременную передачу. Непосредственно электродвигатель соединен со шпинделем центрифуги упругими муфтами. Для привода применяют многоскоростные электродвигатели. Привод сверхцентрифуг и сепараторов осуществляется с помощью редуктора, повышающего частоту вращения.

Общий конструктивный признак трубчатых центрифуг — наличие трубчатого ротора, подвешенного на гибком валу. Диаметр ротора не превышает 150 мм, длина достигает 1 м, частота вращения трубчатых центрифуг — 20 000 в минуту.

На рис. 176 показан общий вид трубчатой центрифуги. Ротор центрифуги подвешен на гибком валу. Привод осуществляется через ременную передачу от вертикально расположенного электродвигателя.

#### § 8.4. Расчет центрифуг

Мощность электродвигателя центрифуги определяют по периоду наибольшей нагрузки. Обычно ее рассчитывают по пусковому периоду.

Основной и ответственный элемент центрифуги — ротор. Цилиндрическая обечайка его испытывает растягивающие напряжения от действия центробежной силы, приложенной к жидкости, заполняющей ротор, и к самому материалу ротора.

Давление жидкости на стенки цилиндра при действии центробежной силы ( $\text{Н/мм}^2$ )

$$p_{\text{ж}} = 0,5 \rho_{\text{ж}} \omega^2 R^2 \phi, \quad (132)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости,  $\text{кг/мм}^3$ ;  $\omega$  — угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;

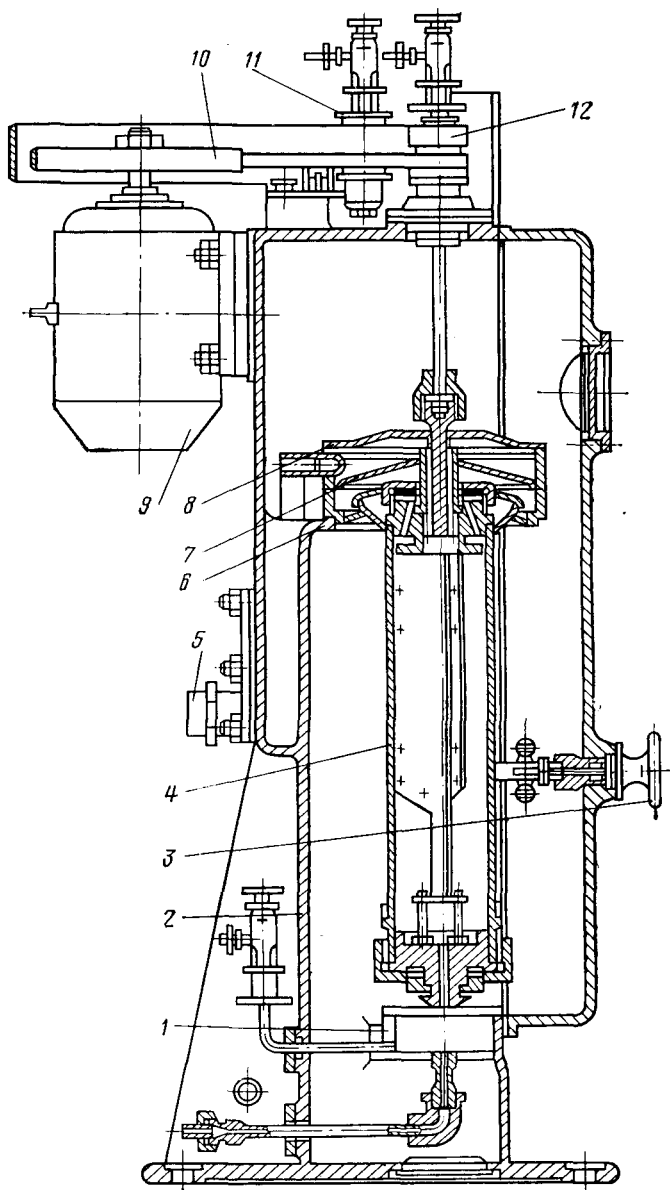


Рис. 176. Трубчатая центрифуга РТР-15:

1 — опора нижняя; 2 — станина; 3 — тормоз; 4 — ротор; 5 — карман приемный; 6 — тарелка нижняя; 7 — тарелка верхняя; 8 — крышка; 9 — электродвигатель; 10 — шкив; 11 — ролик натяжной; 12 — опора верхняя

$R$  — радиус обечайки ротора, мм;  $\psi$  — объемный коэффициент заполнения ротора.

Центробежные силы, действующие на элемент цилиндра площадью  $1 \text{ см}^2$ , можно рассматривать как дополнительную величину внутреннего давления ( $\text{Н/мм}^2$ ), растягивающего обечайку,

$$p_{\text{ц}} = \rho_{\text{м}} s \omega^2 R, \quad (133)$$

где  $\rho_{\text{м}}$  — плотность материала ротора,  $\text{кг/мм}^2$ ;  $s$  — толщина стенки ротора, мм.

Суммарное расчетное давление

$$p = p_{\text{ж}} + p_{\text{ц}}. \quad (134)$$

Цилиндрическую обечайку ротора рассчитывают как обечайку под давлением:

$$s = pD / (2[\sigma]\psi) + c, \quad (135)$$

где  $\psi = (t-d)/t$  — коэффициент ослабления барабана отверстия;  $t$  — шаг между отверстиями;  $d$  — диаметр отверстия.

Ротеры центрифуг имеют сложную форму. Они состоят из нескольких оболочек, связанных между собой, деформирующихся в разной степени. В местах сварки оболочек возникают значительные краевые напряжения, по величине превосходящие растягивающие напряжения. Расчет краевых напряжений подробно изложен в работах [13, 14, 19].

Размеры вала центрифуги определяют конструктивно, а затем проверяют на критическое число оборотов.

## ГЛАВА 9

### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ И ПУЛЬСАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

В последнее время в химической технологии широко применяют аппараты, использующие энергию ультразвука и вибрации [15, 17].

Колебания высокой частоты — эффективное средство интенсификации ряда химических процессов и процессов тепло- и массообмена. В частности, ультразвук используют для диспергирования и эмульгирования, удаления отложений со стенок теплообменных аппаратов и ряда других процессов.

**Ультразвуковые (акустические) аппараты.** Они имеют различное технологическое назначение, но все они состоят из двух основных частей: из самого аппарата, в котором происходит технологический процесс, и генератора ультразвуковых колебаний. Генераторы колебаний в зависимости от принципа действия разделяют на магнитострикционные, гидродинамические и аэродинамические.

Магнитострикционные преобразователи используют свойства ферромагнитных материалов изменять длину в магнитном поле. На рис. 177 показан серийный магнитострикционный преобразователь, состоящий из нескольких сердечников с обмотками. Преобразова-

тели обычно охлаждаются воздухом или водяной рубашкой. Электроакустические преобразователи снабжают излучателями, задача которых заключается в том, чтобы ввести акустическую энергию в рабочую среду. Излучатель делают в виде пластины, которую припаивают к пакету магнестриктора.

Гидродинамический излучатель (рис. 178, а) называют жидкостным свистком. При истечении жидкости из сопла она ударяется

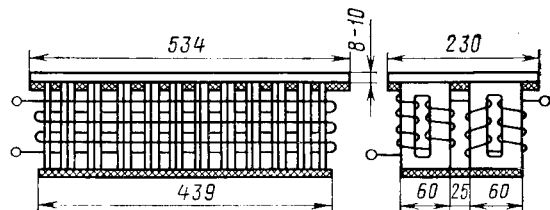


Рис. 177. Магнестрикционный преобразователь

о пластину, которая колеблется с высокой частотой. Наряду с данным типом применяются клапанные излучатели (рис. 178, б). В аэродинамических сиренах (рис. 178, в) колебания создаются за счет того, что поток воздуха или газа периодически прерывается при вращении

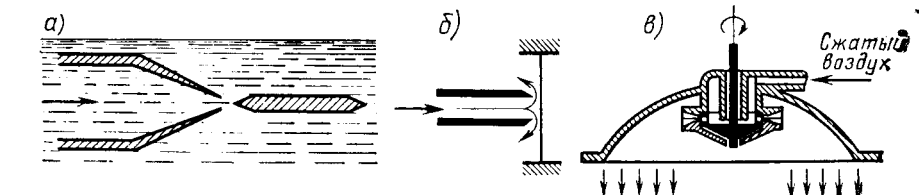


Рис. 178. Гидро- и аэродинамические излучатели

общего назначения, состоящий из корпуса, соединенного непосредственно с магнестриктором. Аппарат имеет две разделенные между собой рубашки для охлаждения самого аппарата и излучателя.

Аппарат для эмульгирования непрерывного действия (рис. 180) состоит из излучателя 1 концентратора ультразвукового излучения 2, который заканчивается излучающей поверхностью 3, и камеры 4, через которую протекают эмульгируемые жидкости. Находят также применение экстракционные и массообменные колонные аппараты.

Экстрактор вертикального типа представляет собой тарельчатую колонну, через центр которой проходит вал с закрепленными на нем гидродинамическими излучателями типа сирены. Вибрационная насадочная колонна, схема которой показана на рис. 181, имеет стаканы, закрепленные на штанге с насадкой, связанной с вибратором. Имеются аппараты, в которых с помощью вибрации

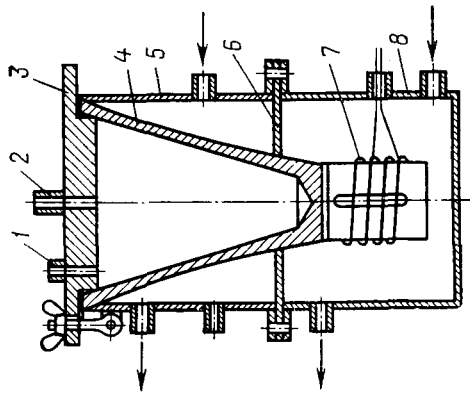


Рис. 179. Реакционный ультразвуковой сосуд:

1, 2 — штуцера; 3 — крышка; 4 — насадка-излучатель; 5 — рубашка сосуда; 6 — мембрана разделительная; 7 — магнитостриктор; 8 — рубашка магнитостриктора

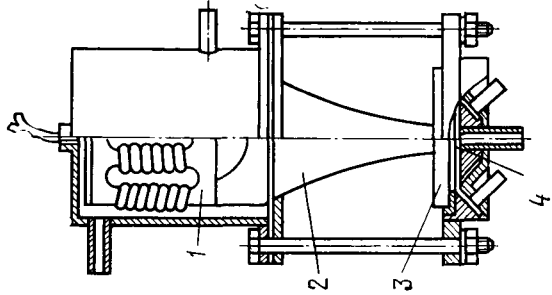


Рис. 180. Аппарат пленочного эмульгирования

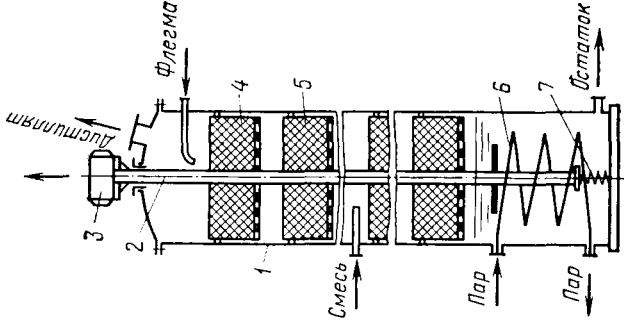


Рис. 181. Вибрационная садоочная колонна:

1 — корпус; 2 — ось; 3 — осевой вибратор; 4 — корзина; 5 — уплотняющее кольцо; 6 — диск; 7 — амортизатор

интенсивно перемешивается сыпучий материал (например, сушил- ки с вибрирующими элементами).

Акустические колебания определенных частот способствуют коагуляции частиц в технике газоочистки. В верхней части коагуляционной камеры, защищенной звукоизоляционным материалом, устанавливают ультразвуковую сирену. Под действием ультразвука взвешенные частички укрупняются, некоторая часть их осаждается в самой камере, а основная масса — в циклоне, установленном за ней.

Значительный интерес представляет способ интенсификации массообменных и других процессов пульсацией; т. е. создание направленного движения реагентов в аппарате специальными механизмами-пульсаторами, которые представляют собой мембранные, поршневые или пневматические устройства, создающие периодически гидравлические удары в жидкости. В рабочей зоне пульсационного аппарата движущиеся части отсутствуют, а источник энергии — пульсатор — вынесен из него наружу.

Схема пневматической пульсационной установки основана на принципе воздушного поршня: воздух через золотниковый распределительный механизм пульсатора поступает в пульсационную камеру аппарата, опускает уровень находящейся в нем жидкости, которая приводит в движение весь объем реагентов в аппарате. Пульсационные аппараты имеют различное технологическое назначение и конструкцию. Их применяют для процессов экстракции, эмульгирования и смешения компонентов, очистки рабочей поверхности фильтров и др.

**Пульсационные аппараты.** Они имеют форму колонн или емкостных аппаратов. Экстракционная колонна с насадкой КРИМЗ, находящая значительное применение, представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, в котором через 50÷300 мм (в зависимости от диаметра) расположены тарелки с пробитыми отверстиями и отогнутыми язычками. Проходя через отверстия, жидкость несколько раз меняет направление движения, что обеспечивает хорошее взаимодействие компонентов.

## РЕАКЦИОННАЯ АППАРАТУРА

## ГЛАВА 10

АППАРАТЫ ДЛЯ КОНТАКТНО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ  
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

## § 10.1. Классификация реакционных аппаратов

Реакционные аппараты — основное оборудование химических цехов. По сравнению с аппаратурой для физико-химических процессов они имеют ряд особенностей: химические реакции, как правило, сопровождаются значительным тепловым эффектом, следовательно, возникает проблема подвода или отвода тепла и регулирования температуры; большинство химических процессов протекает в присутствии катализаторов, что создает, в свою очередь, проблемы хорошего контакта реагирующих продуктов с катализатором, его загрузки, выгрузки и регенерации.

Расчет химических реакционных аппаратов представляет известную трудность. Применить в данном случае обобщения и аналогии, подобные тем, которые имеют место в процессах тепло- и массообмена, не всегда удается. Сложным характером взаимодействия различных факторов объясняется разнообразие конструкций реакционных аппаратов.

В то время как аппаратура для физико-механических процессов практически вся унифицирована, реакционные аппараты большей частью индивидуальны по конструкции. Они, так же как и вся химическая аппаратура, классифицируются по агрегатному составу реагирующих веществ и способу работы — периодическому или непрерывному. Дополнительный фактор — наличие или отсутствие катализатора.

В зависимости от условий работы и конструкции реакционную аппаратуру (рис. 182) можно классифицировать следующим образом.

К аппаратуре для контактно-каталитических и термических процессов в газовой фазе относят аппараты для процессов каталитического окисления, гидрирования, хлорирования и ряда других газовых реакций, идущих в присутствии катализатора. Контактные аппараты делят на аппараты с неподвижным и движущимся слоем катализатора. Аппараты с неподвижным слоем, в свою очередь, подразделяются на адиабатические и аппараты с теплообменом. Контактные аппараты работают при повышенных температурах  $300 \div 800^\circ \text{C}$ .

*Термическими* называют некаталитические газовые процессы, идущие при высоких температурах (до  $2000^\circ \text{C}$ ). К ним относятся процессы пиролиза органических продуктов, термического хлори-

рования, а также реакции, идущие в пламени, например, термоокислительный пиролиз углеводородов. Процессы пиролизно-эндотермические проводят в трубчатых печах или аппаратах с движущимся слоем теплоносителя. Термоокислительный пиролиз идет с выделением тепла, поэтому данную реакцию осуществляют в пустотелых футерованных аппаратах.

Все контактно-каталитические и термические газовые процессы — непрерывные.

Процессы, в которых основой является жидкая фаза, проводятся в аппаратах емкостного, колонного и змеевикового типа. Ап-

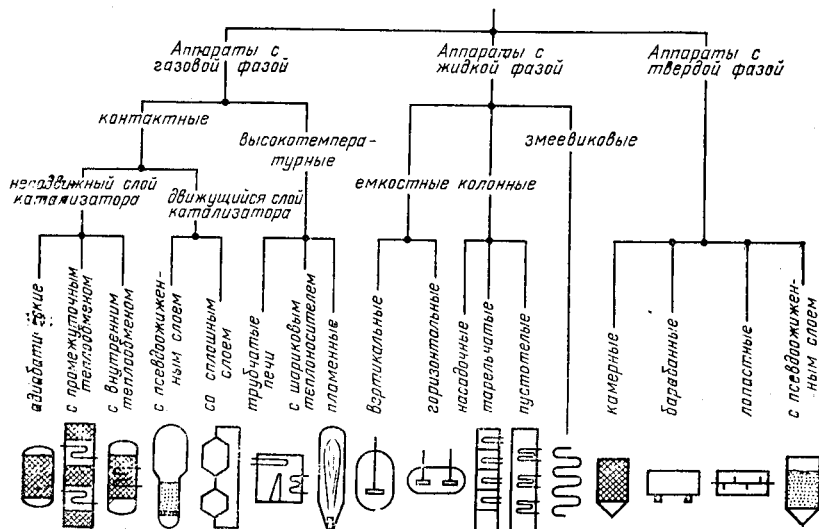


Рис. 182. Классификация реакционных аппаратов

параты емкостного типа применяют в основном для периодических процессов. Они, как правило, имеют перемешивающие устройства. Колонные реакторы применяют для непрерывных процессов. Для непрерывных химических реакций в жидкой (а иногда и в газовой) фазе применяют также змеевиковые аппараты, в которых реагенты с большой скоростью движутся по петлевому змеевику, имеющему теплообменные рубашки.

Для химических процессов в твердой фазе применяют аппараты, описанные в гл. 7, а также некоторые специальные конструкции.

## § 10.2. Контактные аппараты с неподвижным слоем катализатора

Аппараты с неподвижным слоем катализатора — наиболее старый и распространенный тип аппаратов для контактно-каталитических процессов. Конструкция аппаратов определяется температурным режимом, давлением, сроком службы катализатора и свой-

ствами продуктов. Различают оптимальную температуру процесса контактирования, которая постоянна по длине аппарата для эндотермических и необратимых экзотермических реакций и снижается по мере увеличения степени превращения для обратимых экзотермических процессов (реакции синтеза аммиака и окисления сернистого газа). Наряду с оптимальной температурой выделяют максимальную и минимальную, между которыми находится допустимый температурный интервал процесса. Чем уже температурный интервал, тем точнее должна регулироваться температура в аппарате. Когда перепад температуры за счет теплового эффекта не превышает допустимого температурного интервала, применяют адиабатические аппараты, работающие без теплообмена. В остальных случаях необходим теплообмен в аппарате.

Для регулирования температуры в контактных аппаратах применяют промежуточный теплообмен, теплообмен в реакционной зоне (внутренний теплообмен), регулирование температуры путем промежуточного введения газа, теплообмен с помощью твердых теплоносителей.

В системах с промежуточным теплообменом чередуются слои катализатора (зоны реакции) и теплообменники (зоны теплообмена). Процесс в зоне реакции идет адиабатически, затем в теплообменнике происходит охлаждение (или нагрев) и температура снова приближается к оптимальной. Изменение температуры в такой системе ступенчатое. Причем чем больше отдельных слоев катализатора и промежуточных теплообменников, тем больше температурный режим приближается к оптимальному. В начале процесса скорость реакции велика и на первой ступени не требуется большого объема катализатора. На каждой последующей ступени объем катализатора увеличивается. Выделение (или поглощение) тепла в начале процесса очень велико и поверхность первого теплообменника наибольшая. По мере замедления реакции уменьшаются тепловыделения и соответственно поверхность теплообмена. Реакционные зоны и теплообменные элементы могут быть размещены в отдельных аппаратах или соединены в один. Принцип действия системы от этого не меняется.

В аппаратах с внутренним теплообменом необходимый тепловой режим поддерживается теплообменными элементами, расположенными непосредственно в слое катализатора. Контактные аппараты с внутренним теплообменом делают в виде кожухотрубчатых теплообменников с размещением катализатора как в трубках, так и в межтрубном пространстве или в виде пластинчатых теплообменников. Объем трубок значительно меньше межтрубного пространства. При размещении катализатора в трубках уменьшается коэффициент использования объема аппарата, поэтому катализатор помещают в трубках только в тех случаях, когда требуется тонкое регулирование температуры. При конструировании аппаратов с внутренним теплообменом необходимо учитывать распределение температур как по длине аппарата, так и в поперечном сечении. Чем больше расстояние между теплообменными поверхностями, тем выше раз-

аппарата между частками катализатора, расположенными у стенок аппарата и в глубине слоя катализатора.

Аппараты адиабатического типа представляют собой обычно пустотелую камеру, заполненную катализатором. Аппараты имеют осевой или радиальный ход газа. При осевом ходе газа продукты подаются сверху или снизу, при радиальном ходе газ пронизывает слой катализатора по горизонтали. На рис. 183 показан элемент адиабатического аппарата с радиальным ходом газа. Аппарат представляет собой камеру, в которой закреплены два вида перфорированных труб: одни открыты в верхнюю полость аппарата, а другие — в нижнюю. Между трубами засыпан катализатор. Газ входит снизу в трубы, через отверстия попадает в слой катализатора, пронизывает его и через другой ряд труб собирается в верхней части аппарата.

Контактный аппарат производства азотной кислоты работает адиабатически. Окисление аммиака относится к быстротекущим каталитическим процессам. Время реакции 0,04 с. Катализатор для окисления представляет собой плетеную проволочную сетку из платиновых сплавов. Сетка характеризуется толщиной проволоки и количеством отверстий на 1 см<sup>3</sup>. Она должна быть сплетена из проволоки одинакового диаметра и не иметь изъянов (обрывов, заплат и др.). Обычно в аппарате укладывают несколько сеток одна на другую. Они обладают низкой механической прочностью, поэтому их поддерживают натянутыми стальными струнами. В процессе работы сетка сильно разрушается. Образование разрыхленной губчатой поверхности повышает активность катализатора. Многие вещества оказывают каталитическое действие на побочные реакции, снижая тем самым выход азотной кислоты. Например, при соприкосновении газа с нагретыми стенками аппарата происходит частичное разложение аммиака до атмосферного азота, поэтому следует избегать длительного пребывания газовой смеси в аппарате. Для этого аппарат со стороны входа газа делают конической формы с углом конуса не более 40°.

Контактный аппарат (рис. 184) состоит из двух частей — верхней и нижней, соединенных между собой свободными фланцами. Аппарат изготовлен из хромоникелевой стали. На верхней части его крепят картонный фильтр 1, предназначенный для тонкой очистки воздушно-аммиачной смеси. Фильтр состоит из пяти пакетов, расположенных в кольцевом пространстве. Каждый пакет собран из 56 картонных фильтровальных элементов. Воздух входит внутрь элемента и фильтруется через картон. Общая поверхность фильтра 120 м<sup>2</sup>, толщина картона 0,2÷1,25 мм. Температура поступаю-

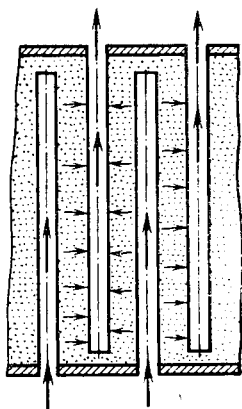


Рис. 183. Элемент адиабатического контактного аппарата с радиальным ходом газа

шей смеси не более 70—80° С (во избежание порчи картона). Выходя из фильтра, газ попадает в верхнюю коническую часть аппарата. На аппарате имеется хлопушка 2, открывающаяся в случае

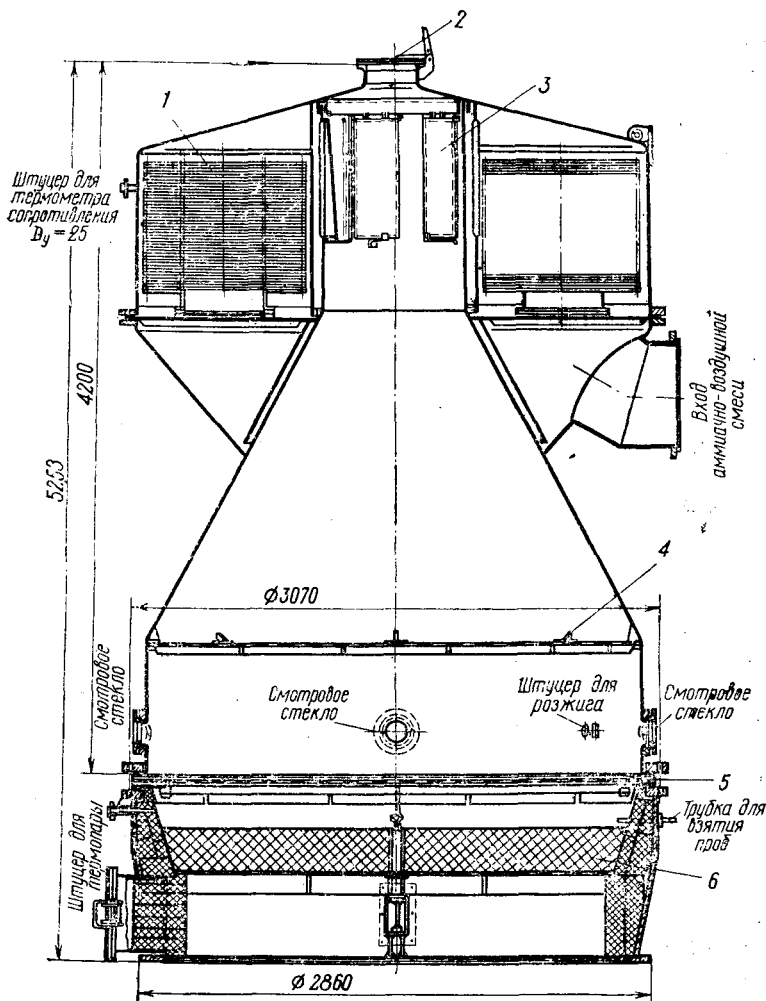


Рис. 184. Контактный аппарат производства азотной кислоты

взрыва. Аммиачно-воздушная смесь входит в верхнюю часть аппарата через окна, прикрытые легкими крышками 3. В рабочем состоянии крышки приоткрыты. В случае взрыва они прижимаются взрывной волной к окнам и предотвращают распространение взрыва по системе. К верхней части крепят распределительную сетку 4 выравнивающую поток газа. Пройдя через сетку, газ подается на катализатор. Катализаторная сетка 5 поддерживается струнами

диаметром 4 мм, натягиваемыми пружинами (рис. 185). В середине аппарата струны опираются на два ребра. Уплотнение выхода струн из аппарата производят с помощью сальников с асбестовой набивкой. Под катализаторными сетками 5 находится слой металлических колец 6 (см. рис. 184). Высота слоя 250 мм. Насадка из колец предназначена для равномерного распределения потока газа. Нижняя часть контактного аппарата футерована шамотным кирпичом. Непосредственно под катализаторной сеткой 5 имеются штуцера для термопары и отбора проб, катализаторные сетки предварительно зажимают между двумя кольцами из кислотостойкой стали и вместе с ними закладывают в аппарат. Для утилизации тепла нитрозных газов под контактным аппаратом установлен прямоточ-

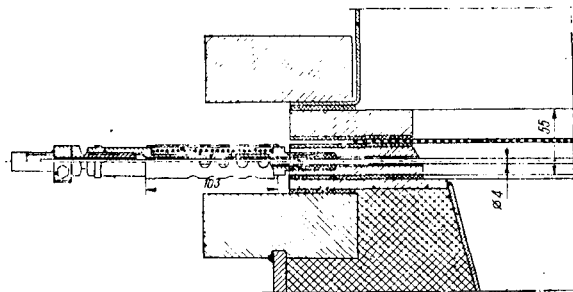


Рис. 185. Узел натяжки струн

ный котел, представляющий собой вертикальный цилиндрический аппарат диаметром 2800 мм и высотой 5 м, в котором находятся четыре секции змеевиков: две нижние служат экономайзером (водоподогревателем), третья — испарителем, а четвертая — пароперегревателем. В котле образуется пар с давлением 4 Н/мм<sup>2</sup> с температурой 450°С.

Наиболее характерным примером полочного контактного аппарата с промежуточным теплообменом является аппарат для каталитического окисления сернистого газа в серный ангидрид, изображенный на рис. 186 [33, 36]. Он имеет цельносварной кожух из листовой стали толщиной 10 мм, футерованный изнутри шамотным кирпичом. В аппарате есть пять полок с катализатором, на четыре верхние загружается кольцеобразная масса, а на нижнюю — гранулированная. Количество катализатора на полках последовательно увеличивается сверху вниз (на самой нижней полке слой катализатора меньше, чем на предыдущей, так как гранулированная контактная масса более активна, чем кольцевая). Газ, предварительно нагретый в наружном и внутренних теплообменниках аппарата, поступает в верхний штуцер с температурой 440°С и попадает на первый слой катализатора, где реагирует около 70% всего сернистого газа. Для охлаждения смеси после первой ступени дополнительно вводится холодный газ. Разбавление контактных газов

непрореагировавшей газовой смесью в самом начале процесса существенно не снижает конечной степени окисления. Под первым слоем установлены штуцера для аварийного подвода воздуха в случае перегрева аппарата. Разбавленный газ проходит последовательно четыре слоя катализатора и расположенные между ними

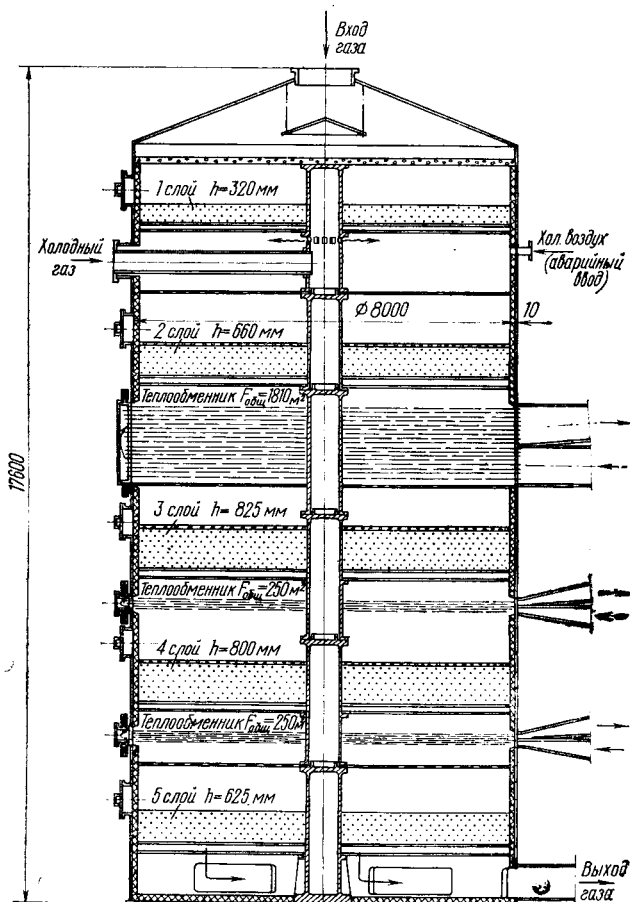


Рис. 186. Пятислойный контактный аппарат

теплообменники. Конечная степень превращения составляет 98%. Газ с температурой 425°С покидает аппарат. Благодаря наличию пяти слоев катализатора с промежуточным охлаждением его температурный режим весьма близок к оптимальному. Так как аппарат имеет большой диаметр, в центре устанавливают опорную колонну, собранную из чугунных труб. На трубах, составляющих колонну, имеются выступы, против которых на корпусе аппарата приваривают кольца из углового железа. На эти кольца и выступы опи-

яются решетки, поддерживающие катализатор. Каждая решетка состоит из восьми секторов. На решетки кладут стальную сетку. На нее насыпают слой дробленого кварца высотой 50 мм, затем катализатор и опять небольшой слой кварца. По сравнению с катализатором кварц — более тяжелый материал, предохраняющий частицы катализатора от уноса потоком газа. В верхнем штуцере на входе газа установлен распределительный конус с отверстиями. Для равномерного распределения потока газа по сечению аппарата в верхней части имеется слой дробленого кварца, а после первого и четвертого слоев установлены распределительные сетки. Равномерное распределение газа в контактных аппаратах большого диаметра играет существенную роль. Если оно будет нарушено, основная масса газа устремится в центральную часть аппарата, а сбоку останутся застойные пространства.

Двухходовые теплообменники собирают из труб диаметром  $57 \times 2,5$  мм и длиной 7 м. Газ в теплообменниках проходит сначала по нижним трубкам, затем по верхним. Вход и выход размещены с одной стороны, противоположный конец закрыт глухой крышкой и имеет компенсатор теплового удлинения трубок.

Аппарат устанавливают под открытым небом и обслуживают с площадок.

В качестве характерной конструкции с катализатором, загруженным в трубах, приведен аппарат для каталитического окисления нафталина или ортоксилота во фталевый ангидрид при температуре  $400 \div 430^\circ \text{C}$  [40]. Реакция окисления нафталина идет с большим выделением тепла и в то же время требует тонкого регулирования температуры; отклонение температуры от оптимальной на  $4 \div 6^\circ \text{C}$  уже вызывает существенное нарушение процесса. Указанное обстоятельство и определило конструкцию аппарата. Он представляет собой теплообменную трубчатку с трубками малого диаметра  $30 \times 2$  мм, в которые загружается катализатор. В межтрубном пространстве циркулирует промежуточный теплоноситель — расплав солей (смесь нитрата и нитрита натрия). Применение жидкого теплоносителя позволяет вести процесс в очень «мягком» температурном режиме — разность температур между теплоносителем и реакционной зоной не превышает  $6 \div 8^\circ$ . Тепло отводят от расплава солей двумя способами — в выносном теплообменнике, тогда применяют выносной циркуляционный контур или устанавливают теплообменник, встроенный в аппарат, как это показано на рис. 187. Здесь теплообменный элемент для отвода тепла реакции от расплава солей («парогенератор» 2) представляет собой установленный в центре аппарата пучок вертикальных труб, связанных кольцевыми коллекторами. Тепло от расплава отводится за счет кипения воды в парогенераторе 2 при давлении  $1,0 \div 2,4 \text{ Н/мм}^2$ . Чтобы избежать отложения солей в парогенераторе, дистиллированная вода циркулирует в замкнутом контуре. Циркуляция расплава солей производится с помощью осевой мешалки 3, направление циркуляции совпадает с естественной конвекцией жидкости, т. е. в трубчатке 1 она движется снизу вверх. Аппарат, показанный

на этом рисунке, имеет большие размеры (диаметр 4 м), в нем установлено почти 10 000 контактных труб. Катализатор удерживается в трубках с помощью пружин (рис. 188), что позволяет менять его в случае необходимости в любой трубке, не трогая остальных. Температурный процесс контролируют несколько десятков термопар, установленных как в трубках, так и в межтрубном пространстве.

Другим примером трубчатого контактного аппарата, но с катализатором, загруженным в межтрубное пространство, могут служить колонны синтеза аммиака, представляющие собой контактный аппарат высокого давления [34, 35, 37, 41]. Эти колонны имеют различное устройство, однако их конструируют по общим принципам, выделяют две основные части — корпус и насадку («начинку»). Корпус — это оболочка колонны, выдерживающая высокое давление, при котором проводится синтез. Насадка колонны имеет теплообменные элементы, катализаторные коробки и другие внутренние устройства.

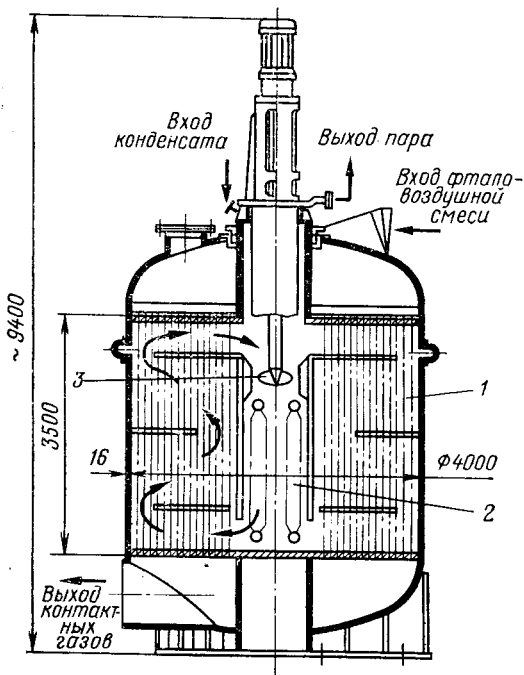


Рис. 187. Контактный аппарат в производстве фталевого ангидрида

К колоннам синтеза аммиака предъявляются следующие общие требования: 1) все соединения

колонны должны обеспечивать полную герметичность; 2) коэффициент использования объема колонны (степень заполнения катализатором) следует принимать наибольшим; 3) тепловой режим колонны должен наилучшим образом приближаться к оптимальному; 4) управление режимом колонны должно быть наиболее гибким; 5) внутренние стенки корпуса необходимо надежно защищать от действия высокой температуры; 6) насадка должна быть механически прочной, отдельные части насадки должны быть надежно соединены во избежание пропуска газов мимо катализатора; 7) нужно, чтобы конструкция затворов крышки и насадки обеспечивала быструю сборку и разборку крышки.

Для защиты стенок корпуса от действия высоких температур холодный газ, поступающий в колонну, подают в кольцевой зазор между насадкой и внутренней стенкой корпуса.

Реакция синтеза аммиака идет с выделением тепла, которое используется обычно в самой колонне на подогрев исходных продуктов реакции, а в современных крупных агрегатах избыточное тепло частично используется для получения пара. На рис. 189 показано устройство колонны синтеза аммиака, применяемое в СССР. Колонна с двойными теплообменными трубками состоит из катализаторной коробки сверху и теплообменника в нижней части. Исходная азотводородная смесь подается в верхний штуцер и проходит сверху вниз по узкой кольцевой щели между стенкой корпуса и внутренней насадкой колонны. Холодный газ предохраняет корпус колонны от перегрева. В нижней части аппарата газ проходит в межтрубное пространство теплообменника 3, где нагревается за счет отходящих газов и по центральной трубе поднимается в верхнюю часть катализаторной коробки. В центральной трубе расположен электроподогреватель 10, включающийся в период пуска и в случае переохлаждения колонны. В верхней крышке катализаторной коробки размещены двойные теплообменные трубки 8. Газ опускается по внутренним трубкам и поднимается по наружным. За время движения по наружным трубкам он нагревается за счет теплообмена с катализаторной зоной. После теплообменных трубок газ проходит сверху вниз слой катализатора, а затем трубки нижнего теплообменника. Из колонны он выходит с температурой 200—220° С. Через нижний штуцер по трубе в колонну вводится холодный газ в обход теплообменника («холодный байпас») 6, который включается в случае недопустимого повышения температуры.

Насадка колонны состоит из двух основных частей: теплообменника и катализаторной коробки. Теплообменник имеет две трубные решетки 7, в которых развальцованы 3145 трубок размером 22×2 мм. Общая поверхность теплообмена 228 м<sup>2</sup>. К верхней трубной решетке приварен кожух 2. Между ним и нижней решеткой имеется щель, через которую газ входит в теплообменник. В межтрубном пространстве имеются поперечные перегородки 4, направляющие поток газа перпендикулярно трубкам. Нижняя трубная доска закрыта крышкой 5, имеющей центральный штуцер, соединенный с нижним выходным штуцером аппарата. Соединение между теплообменником и корпусом аппарата — шарнирное. Наконечник штуцера крышки теплообменника имеет сферическую уплотняющую поверхность, благодаря чему уплотнение не нарушается

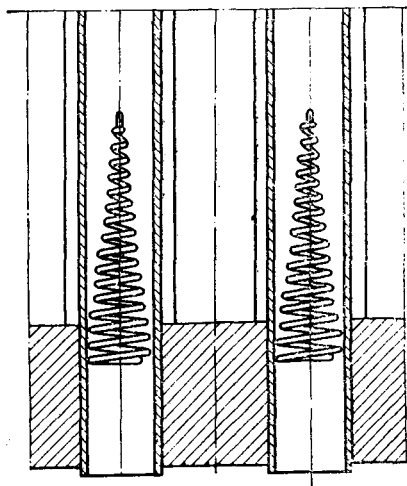


Рис. 188. Пружины, поддерживающие катализатор

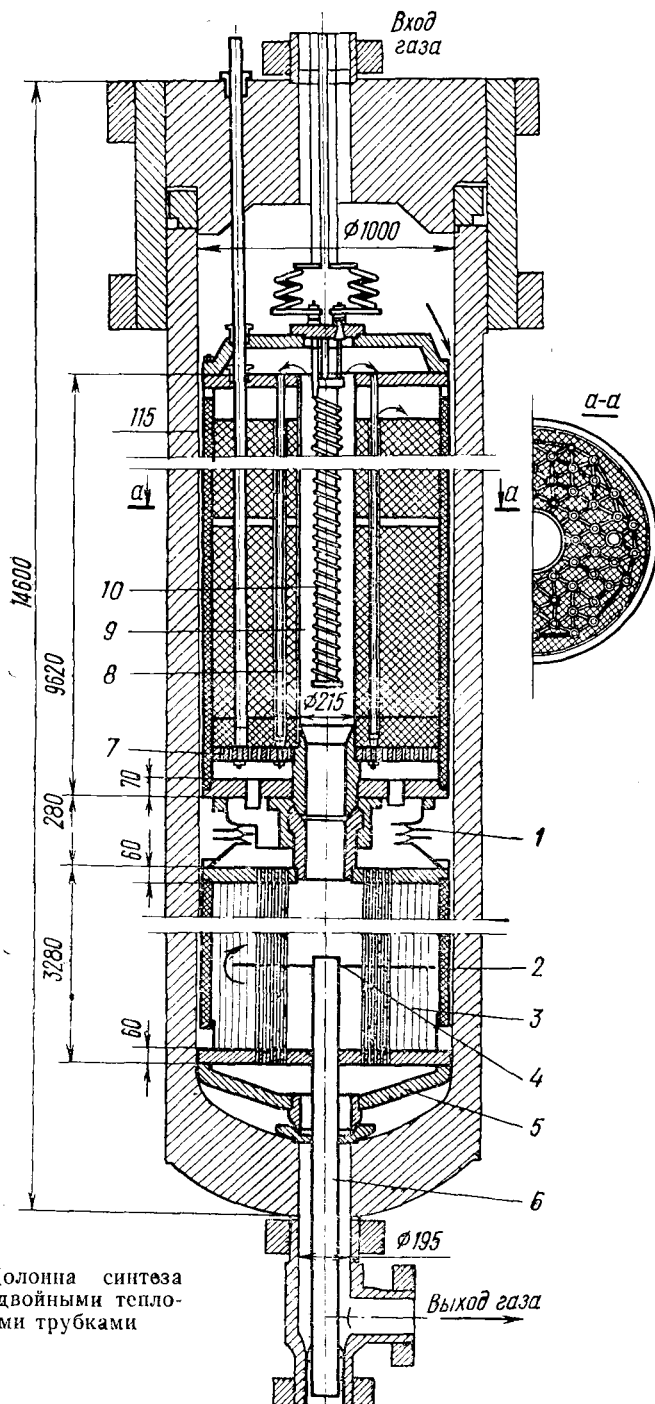


Рис. 189. Колонна синтеза аммиака с двойными теплообменными трубками

при незначительном перекосе теплообменника. Уплотнение осуществляется за счет веса самой насадки. Через центральный штуцер в теплообменник вводится байпасная труба 8, по которой подается холодный газ в случае перегрева колонны. Газ из межтрубного пространства теплообменника через штуцер поступает в центральную трубу 9 катализаторной коробки, в которой расположен спиральный подогреватель. Соединение между теплообменником и ка-

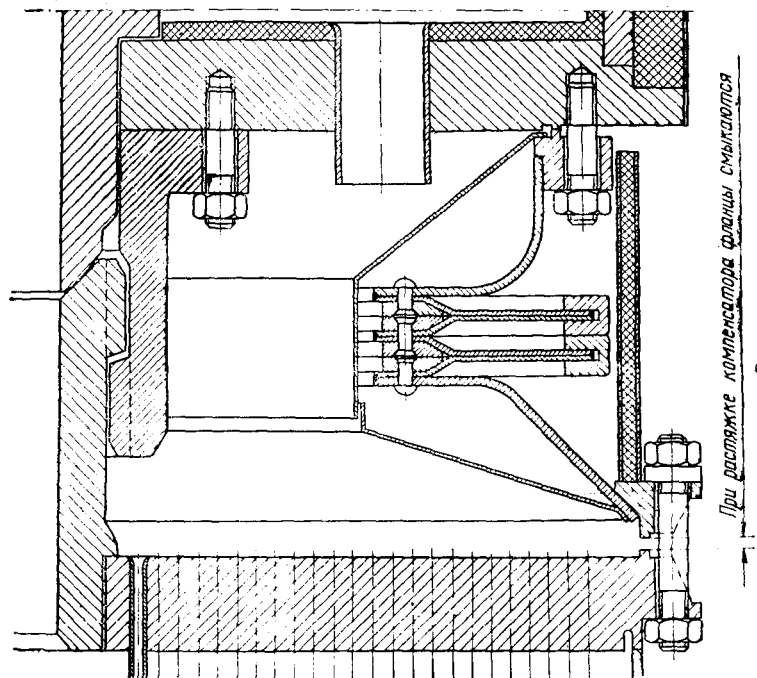


Рис. 190. Соединение катализаторной коробки с теплообменником

тализаторной коробкой — шарнирное. Для того чтобы коробку и теплообменник можно было вынуть из аппарата как одно целое, на штуцерах имеются зубья и впадины. При повороте катализаторной коробки зубья заходят за впадины, затем между коробкой и теплообменником устанавливают гибкий компенсатор 1, который окончательно их связывает (рис. 190).

Насадка оказывает значительное гидравлическое сопротивление потоку газа. Общие потери напора в насадке  $0,8 \text{ Н/мм}^2$ , поэтому давление в межтрубном пространстве теплообменника (начало пути газа) превышает давление в трубах (конец пути газа) на  $0,7—0,8 \text{ Н/мм}^2$ . Межтрубное пространство теплообменника подвергают гидравлическому испытанию на  $1,1 \text{ Н/мм}^2$ .

Катализаторная коробка состоит из обечайки и центральной трубы, связанных по концам верхней и нижней трубными досками. Верхняя трубная доска накрыта крышкой. Внизу имеется решетка, на которую насыпают катализатор. В слое катализатора находятся 64 двойные теплообменные трубки. Трубка состоит из наружной трубы диаметром 45 мм и внутренней диаметром 22 мм. Для того чтобы уменьшить теплообмен в верхнем слое катализатора, во внутреннюю трубу вставляют патрубок, погружаемый на 700 мм в слой катализатора. Внутренняя труба и вставленный в нее патрубок развальцованы в верхней трубной доске. Наружную трубу крепят нижним заглушенным концом к решетке.

Через крышку аппарата в катализаторную коробку вводят две термопары 11 (см. рис. 189). Чехлы для термопар крепят к решетке. Электронагреватель 10 представляет собой гирлянду фарфоровых изоляторов, надетых на общий стержень, на которые намотана спираль из нихрома. Мощность нагревателя 350 кВт, напряжение 380 В. Электроввод осуществляют через крышку колонны, для чего на крышке катализаторной коробки имеются два пружинных контакта, к которым прижимаются штанги, опущенные сверху.

Насадки колонн синтеза аммиака должны быть удобны в монтаже и обладать достаточной механической прочностью. Механические повреждения (разрывы трубок, нарушения герметичности соединений и др.) возникают в основном из-за температурных напряжений, поэтому наименее прочными оказываются насадки жесткой конструкции. При повреждении насадки нарушается нормальный ход газа и производительность колонны резко падает.

Катализатор — один из важнейших элементов контактных аппаратов, которому уделяется большое внимание.

Наряду с требованиями к химической активности к нему предъявляют требования механического порядка: механическая прочность и стойкость к истиранию, размеры зерен катализатора должны быть одинаковы, не должно быть мелочи. При засыпке катализатора в полочные аппараты тщательно следят, чтобы слой был ровный, при загрузке катализатора в трубчатых аппаратах проверяют, чтобы гидравлическое сопротивление слоя в каждой трубке было одинаковым.

Как правило, газ в аппаратах направляют сверху вниз, чтобы поток газа прижимал слой катализатора. При противоположном направлении потока необходимы специальные меры по фиксации слоя.

Загрузка и разгрузка катализатора в крупнотоннажных аппаратах — весьма трудоемкая операция, которую в настоящее время стараются механизировать.

### § 10.3. Контактные аппараты с псевдооживленным катализатором

Аппараты с псевдооживленным слоем незаменимы для процессов, в которых катализатор требует постоянной регенерации, например в процессе крекинга нефтепродуктов [38]. Катализатор

иногда теряет активность в течение нескольких минут вследствие за-  
бывания его пор коксом и смолистыми веществами. Применение  
системы с движущимся катализатором позволяет осуществить его  
циркуляцию через зону реакции и  
регенерации катализатора. Наряду  
с возможностью циркуляции ката-  
лизатора температура в псевдоожиг-  
женном слое устанавливается прак-  
тически одинаковой и нет необходи-  
мости в сложных теплообменных  
устройствах. Подводить или отво-  
дить тепло можно в какой-либо од-

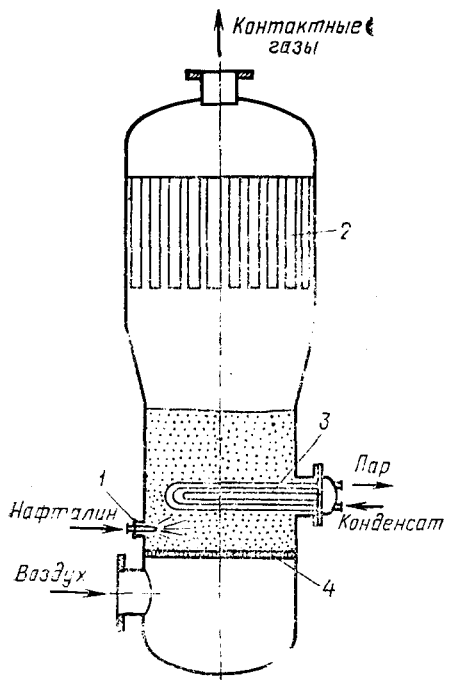


Рис. 191. Контактный аппарат для окисления нафталина в псевдоожиг-  
женном слое катализатора

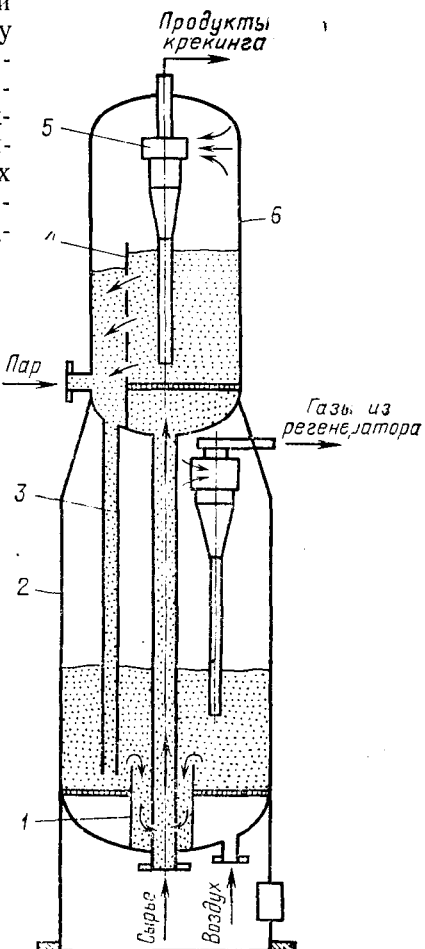


Рис. 192. Агрегат для крекинга нефти с циркуляцией катализатора

ной точке аппарата и при больших разностях температур. В псев-  
доожигженном слое имеет место идеальное смешение продуктов, что  
снижает конечную степень превращения — одну из важнейших ха-  
рактеристик процесса. Чтобы избежать этого недостатка и прибли-  
зиться к схеме идеального вытеснения, аппарат разбивают на сек-  
ции или применяют заторможенный псевдоожигженный слой, в ко-  
тором камера заполняется какими-либо элементами (например,  
спиралями), препятствующими продольному перемешиванию.

По конструкции различают установки с постоянным и циркулирующим катализатором, одно- и многослойные. На рис. 191 показан аппарат для окисления нафталина во фталевый ангидрид в псевдооживленном слое. Катализатор в данном процессе служит длительное время и не нуждается в непрерывной регенерации. Аппарат имеет форму цилиндра с расширением в верхней части. Через колпачковую распределительную решетку 4 в слой подается горячий воздух, который является и оживляющим агентом. Нафталин на окисление подается через форсунки 1 непосредственно в слой. Тепло реакции отбирается U-образными горизонтальными теплообменными элементами 3, расположенными в слое; хладагентом служит кипящая вода. В верхней части аппарата вертикально установлены патронные фильтрующие элементы 2 из стеклоткани, которые очищают контактные газы от пыли катализатора. Из описания конструкции видно, что аппарат с псевдооживленным слоем значительно проще аппарата со стационарным слоем катализатора для аналогичного процесса (см. рис. 187), однако выход и качество продукта на стационарном слое выше, чем в псевдооживленном.

Установки с циркулирующим катализатором широко применяют для процессов каталитического крекинга. Крекинг всегда сопровождается образованием и отложением на поверхности катализатора кокса и смолообразных продуктов. Выжигают кокс воздухом в строго контролируемых условиях, так как процесс выжигания сопровождается значительным выделением тепла. Реактор и регенератор komponуют в один агрегат или отдельно стоящие аппараты. На рис. 192 приведен агрегат с нижним расположением регенератора. Сырье вводится в нижнюю часть агрегата и в эжекторе 1, захватывая регенерированный катализатор, по центральной трубе через распределительную решетку поступает в реактор 6. С помощью вертикальной перегородки 4 в реакторе выделена отпарная секция, в которую под решетку подается пар в таком количестве, чтобы псевдооживленный слой катализатора был в ней менее плотный, чем в реакционной зоне. За счет разности плотностей обеспечивается переток катализатора через прорези в перегородке 4. Отпаренный катализатор спускается по опускной трубе 3 в регенератор 2. Таким образом, отпарная секция служит затвором, разделяющим зону реакции и регенерации. Продукты крекинга в реакторе и отходящие газы в регенераторе отделяются от частиц катализатора в сепарационных зонах, а мелкие частицы, уносимые с газом, выделяются в циклонах 5, установленных внутри камер. Частицы из циклонов выгружаются по трубе, опущенной в слой катализатора, или с помощью автоматического затвора-мигалки, установленного под циклоном.

#### **§ 10.4. Аппаратура для высокотемпературных процессов**

**Трубчатые печи.** Для проведения высокотемпературных эндотермических процессов в нефтяной и нефтехимической промышленности применяют трубчатые печи, основную часть которых составляет

змеевик, помещенный в топочную камеру. В химической промышленности эти печи применяют редко. Печь представляет собой сложный высокопроизводительный агрегат, тепловая мощность которого доходит до  $15 \div 20$  млн. ккал/ч. Она работает на жидком или газообразном топливе.

Трубчатые печи позволяют обрабатывать продукты при температуре до  $800^\circ\text{C}$ . В зависимости от характера передачи тепла различают конвекционные, радиантные и смешанные (радиантно-кон-

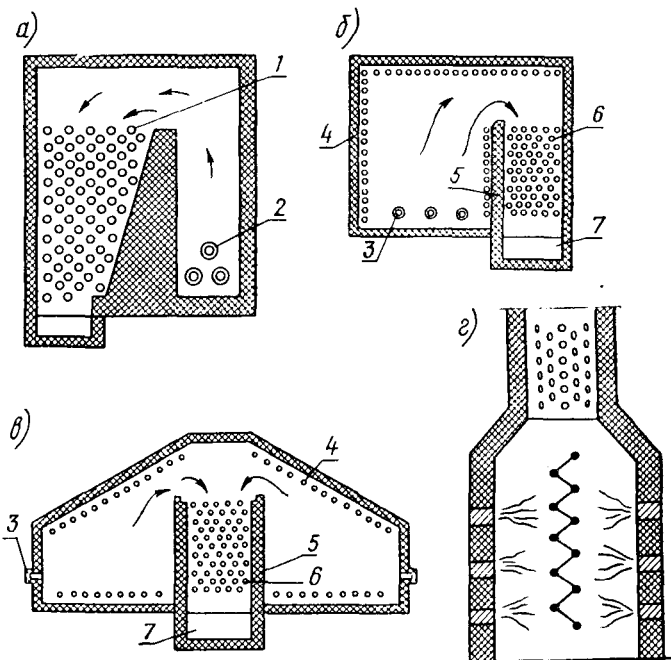


Рис. 193. Типы трубчатых печей

векционные) печи. В конвекционных (рис. 193, а) нагрев осуществляется при омывании змеевика 1 горячими газами, поступающими из топки 2. Тепло передается в основном за счет конвекции (отсюда и название печи). В радиантной печи змеевик расположен прямо в топке и тепло передается в основном за счет лучеиспускания (радиации). Широко применяются печи смешанного типа, состоящие из двух частей — радиантной и конвекционной.

Классическая конструкция трубчатой печи коробчатого типа сейчас широко распространена (рис. 193, б). Печь состоит из радиантной 4 и конвекционной 6 камер, разделенных перевальной стенкой 5. Радиантная камера имеет потолочный и боковые экраны из змеевиков. В нижней части камеры расположены форсунки 3 для жидкого топлива или газовые горелки. Топочные газы обходят

перевальную стенку, пронизывают сверху вниз трубы конвекционной секции и уходят в дымоход 7.

Кроме коробчатой печи, применяют двухкамерную печь с наклонными сводами (рис. 193, в). Наклон потолочной секции улучшает распределение тепловой нагрузки между трубами радиантной секции. В настоящее время разработана конструкция высокопроизводительной печи с излучающими стенками из беспламенных панельных горелок (рис. 193, г), которая имеет производительность в  $2 \div 2,5$  раза больше, чем печи старой конструкции.

Экран в радиантной секции делают обычно однорядным, так как трубы второго ряда обогреваются значительно хуже. Змеевики

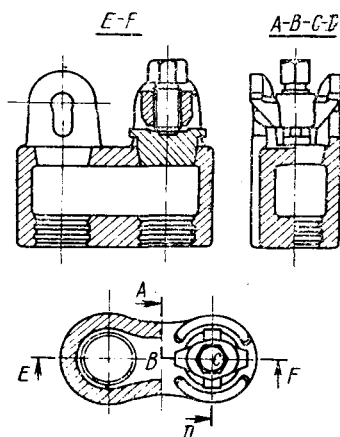


Рис. 194. Коробчатый ретурбэнд

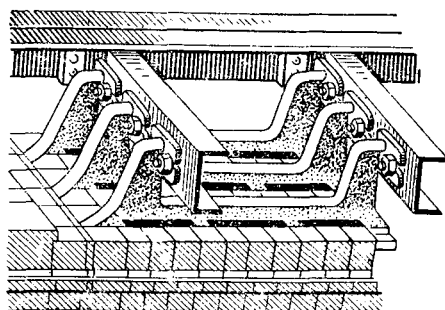


Рис. 195. Элемент подвешенного свода

трубчатых печей изготовляют из труб длиной  $6 \div 18$  м, диаметром  $75 \div 150$  мм. Продукт движется по трубам одним или несколькими параллельными потоками. Скорость жидких продуктов в змеевике  $1 \div 3$  м/с, а при переработке газов и паров  $20 \div 100$  м/с. Малые скорости в трубчатой печи недопустимы из-за опасности местных перегревов и разложения органических продуктов. Давление в змеевике может быть различным: в печах высокого давления до  $100 \text{ Н/мм}^2$ , а в обычных условиях должно быть достаточным для преодоления значительных гидравлических сопротивлений, которые достигают  $3 \div 4 \text{ Н/мм}^2$ .

Конвекционные трубы изготовляют из углеродистых сталей, радиантный змеевик — из легированных. Для особо тяжелых режимов работы применяют хромоникелевые стали. Трубы соединяются калачами или специальными двойниками (ретурбендами). Простейший ретурбэнд коробчатого типа показан на рис. 194. Ретурбэнд имеет два гнезда, в которых развальцовываются концы труб. Напротив труб расположены отверстия для прочистки и развальцовки, которые закрываются пробками. Пробки крепят специаль-

ными клиньями. Ретурбенды по конструкции сложнее, чем калачи, однако они упрощают очистку труб, так как снять пробку ретурбенда гораздо проще, чем разобрать фланцевое соединение калача. За последнее время в практику вошла паровоздушная очистка труб, которая позволяет отказаться от ретурбендов и сделать змеевик цельносварным.

Футеровку печи делают из шамотного кирпича. Так как трубчатая печь имеет большие размеры и ее невозможно перекрыть полукруглым кирпичным сводом, потолок печи делают подвесным из фасонных кирпичей. Кирпичи насаживают на балочки из жароупорной стали, подвешиваемые к балкам каркаса (рис. 195).

В печах старого типа стены выкладывали из огнеупорного кирпича, в современных печах применяют блочную облицовку из фасонного кирпича. Блоки собирают на балках, крепящихся к каркасу печи. Подвесная блочная облицовка значительно уменьшает вес печи и упрощает ее монтаж. Трубы радиантной секции опираются на подвески и кронштейны, которые также крепят к балкам каркаса.

Из-за тяжелых условий работы подвески и кронштейны изготовляют из жаропрочной стали. Трубы конвекционной секции поддерживаются трубными решетками из чугуна или листовой стали. Каркас печи изготовляют из стальных балок и крепят к нему площадки и лестницы для обслуживания печи. Печи имеют большие размеры и выделяют очень много тепла, поэтому их устанавливают под открытым небом. Трубчатые печи работают на искусственной или естественной тяге. Обычно бывает достаточной естественная тяга, создаваемая трубой высотой  $20 \div 25$  м.

Печь с излучающими стенками [5] (рис. 196) представляет собой узкую камеру, в середине которой расположен двухрядный экран 2. Напротив экрана с обеих сторон помещены панельные горелки 3 для сжигания газа. Конвекционная секция 4 находится сверху. Дымовые газы проходят ее снизу вверх и попадают в дымовую трубу 1. Панельные горелки изготовляют из специальных сортов керамики, которая служит катализатором процесса горения. Газ, поступающий в горелку, предварительно смешивается с воздухом. Горит газовоздушная смесь в мелких туннелях, объединенных в керамическую панель. Эти горелки позволяют регулировать тепловую нагрузку на разных участках экрана и наиболее полно использовать его поверхность.

Для обеспечения нормальной работы трубчатой печи следят за правильным тепловым режимом. Ни в коем случае нельзя допускать превышения допустимой температуры в трубах радиантной секции. Радиантные трубы в ходе эксплуатации покрываются слоем кокса, поэтому их необходимо периодически чистить. Механическую очистку производят через отверстия в ретурбендах с помощью скребков и шарошек, затем продувают воздухом. Паровоздушная очистка заключается в выжигании кокса воздухом. Для этого паровоздушную смесь пропускают по трубам при незначительном

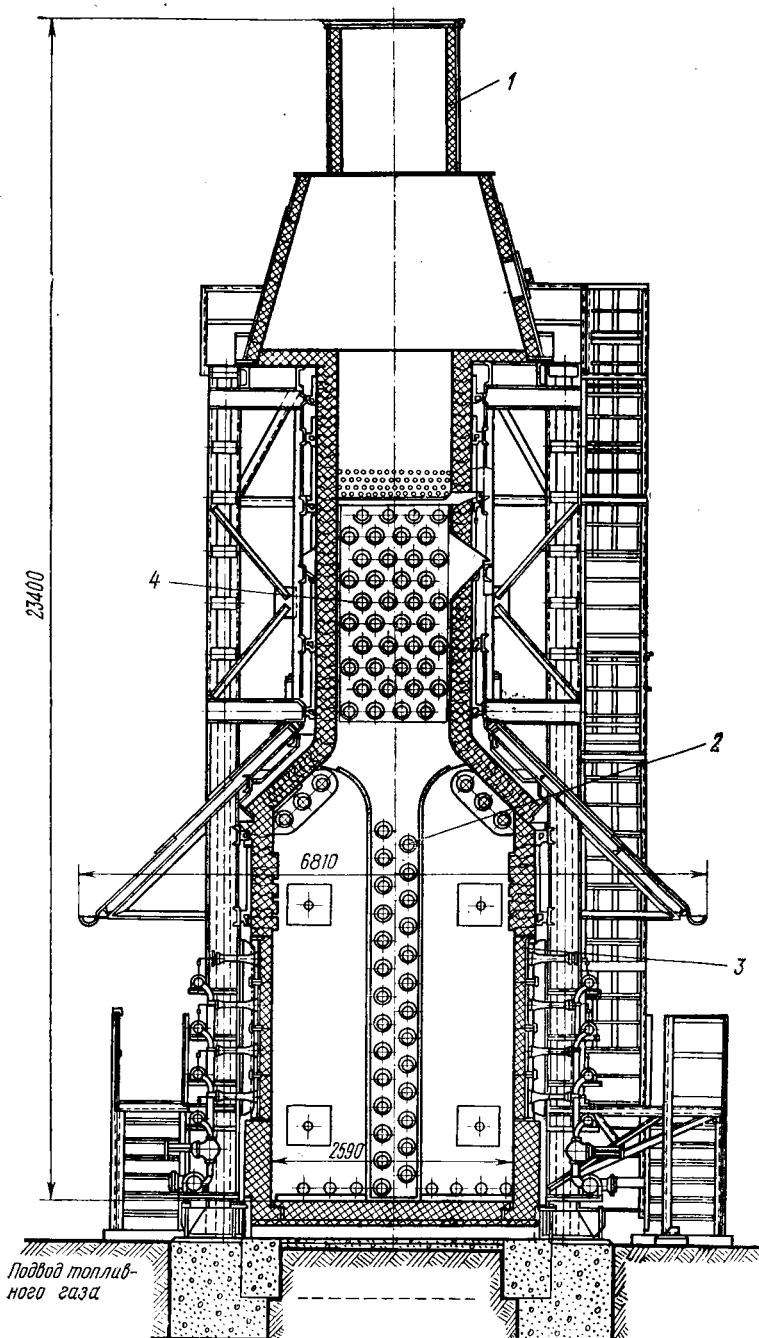


Рис. 196. Печь с излучающими стенками

нагреве печи. Паровоздушный способ значительно упрощает и ускоряет очистку, однако требует тщательного температурного контроля, так как перегрев приводит к прогару труб. Стальной каркас печи и особенно потолочные балки необходимо надежно предохранять от действия высоких температур, поэтому следует постоянно следить за исправностью обмуровки печи и тепловой изоляции.

**Установки с движущимся твердым теплоносителем.** Их применяют для высокотемпературных эндотермических процессов, когда даже жаропрочные стали недостаточно устойчивы. Эти установки широко применяют для пиролиза углеводородного сырья с целью получения водорода, этилена, бутадиена, моторного топлива и других продуктов.

На рис. 197 показана схема установки для получения водорода пиролизом метана. Пиролиз (термическое разложение) идет с поглощением тепла при температуре  $1400 \div 1450^\circ \text{C}$ . Установка состоит из топki 2, реактора 3 и пневмоподъемника. Зернистый теплоноситель нагревается за счет сжигания горючего газа и сыпается в реакционную камеру, где происходит пиролиз. В нижнюю часть камеры подается метан. Водород отводится через верхний штуцер. Затем теплоноситель вместе с сажой, образовавшейся при пиролизе, опускается в эжектор 4 пневмоподъемника, там он подхватывается потоком воздуха и возвращается в топку. Температура его опять доводится до  $1400^\circ \text{C}$ . Для пополнения запаса теплоносителя в верхней части топki устанавливается бункер для подпитки 1.

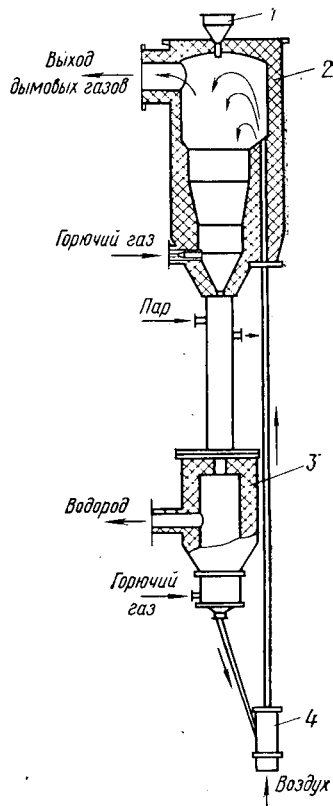


Рис. 197. Установка с движущимся теплоносителем

Твердые теплоносители должны обладать следующими свойствами: жаростойкостью, стойкостью к резким колебаниям температуры, химической стойкостью, высокой механической прочностью (особенно высокой стойкостью к истиранию). Этим требованиям удовлетворяют зерна размером  $6 \div 12$  мм из силиката циркония, окиси алюминия и каолина.

Топку и реактор футеруют огнеупорным кирпичом высокой плотности, который хорошо противостоит истиранию. Топка имеет коническое днище и заканчивается отверстием, через которое зернистый материал пересыпается в реактор. Пространство между реактором и топкой продувают паром или инертным газом, чтобы

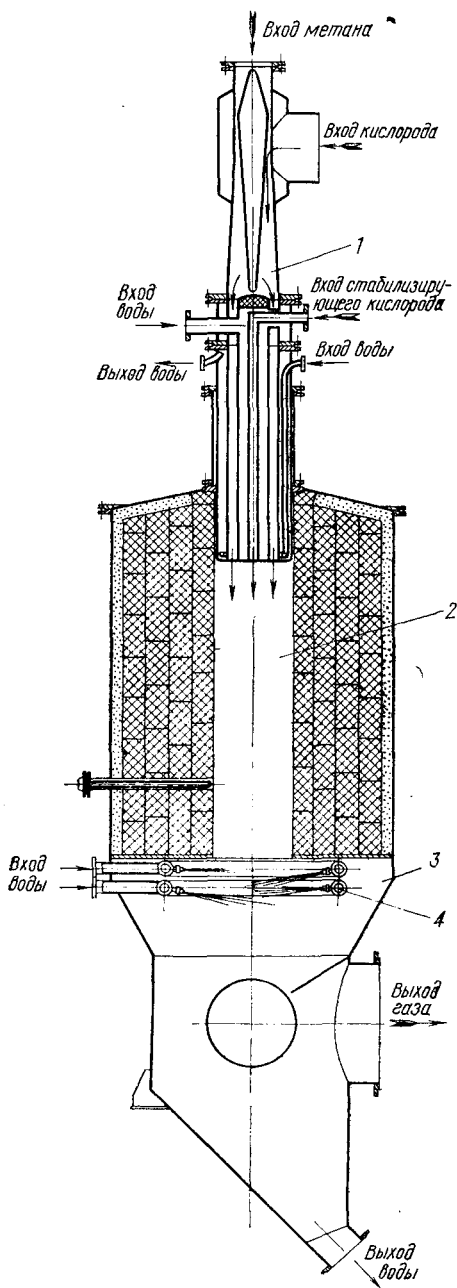


Рис. 198. Конвертор термоокислительно-го пиролиза

предотвратить попадание в топку углеводородных газов. Реактор представляет собой цилиндрический пустотелый аппарат, через который сплошным потоком движется слой зернистого материала. В аппарате большого размера необходимо обеспечить равномерное распределение материала по его сечению. Для загрузки теплоносителя устанавливают распределительные трубы. Разгрузку осуществляют через кольцевую щель или несколько отдельных отверстий.

**Аппараты для реакции в пламени.** В качестве примера приведен аппарат для термоокислительного пиролиза метана, при котором часть метана сжигается с кислородом для подогрева остальной части газа до высокой температуры ( $1300 \div 1500^\circ \text{C}$ ) и компенсации теплового эффекта реакции. Таким образом, термоокислительный пиролиз — пример химического процесса, тепловой баланс которого уравнивается за счет одновременного проведения двух реакций с различным знаком теплового эффекта.

Контактные газы после пиролиза быстро охлаждают («закачивают»). Закалка преследует цель «заморозить» равновесную систему, полученную при высокой температуре, и предотвратить разложение ацетилена, неизбежное при медленном охлаждении контактных газов. Реактор термоокислительного пиролиза (рис. 198) состоит из камер смешения 1, сгорания 2 и закалки 3. Метан и кислород, нагретые предварительно до  $700^\circ \text{C}$ , по-

ступают в смесительную камеру 1, из которой газовая смесь попадает в камеру сгорания 2, газы движутся в каналах камеры с большой скоростью, что предохраняет ее от обратного проскока пламени в смесительную камеру. Для интенсификации процесса горения непосредственно в горелки подается добавочное количество кислорода (10%). Газы, выходящие из горелок, попадают в камеру заделки 3, где их охлаждают водой, которую впрыскивают через сопла 4 в кольцевом коллекторе. Процесс пиролиза протекает в камере горения и частично в камере заделки.

## ГЛАВА 11

### ЕМКОСТНАЯ РЕАКЦИОННАЯ АППАРАТУРА

#### § 11.1. Основные типы емкостных реакционных аппаратов

Емкостные реакционные аппараты применяют для процессов, где основной является жидкая фаза (системы «жидкость — жидкость», «жидкость — газ», «жидкость — твердое тело»). Они, как правило, имеют перемешивающее устройство [42]. Емкостные аппараты с мешалками используют не только как химические реакторы, но и для различных физико-химических процессов — получения эмульсий, растворения, смешения жидких компонентов и др.

Условия работы и конструкция емкостных аппаратов с мешалками весьма разнообразны. Они имеют емкость от 0,04 до 100 м<sup>3</sup>, а рабочее давление до 10,0 Н/мм<sup>2</sup>. Внутреннее устройство в зависимости от условий работы также может быть весьма различным.

В качестве конструкционного материала для емкостных аппаратов с перемешивающими устройствами широко применяют углеродистую и кислотостойкую сталь, иногда — титан и медь, реже — чугун, алюминий и никель. Широко используют стальные эмалированные, футерованные и гуммированные аппараты. Аппараты небольших размеров изготавливают из пластмасс.

В качестве теплообменных элементов для аппаратов с мешалками применяют рубашки или змеевики. Рубашка конструктивно более прос-

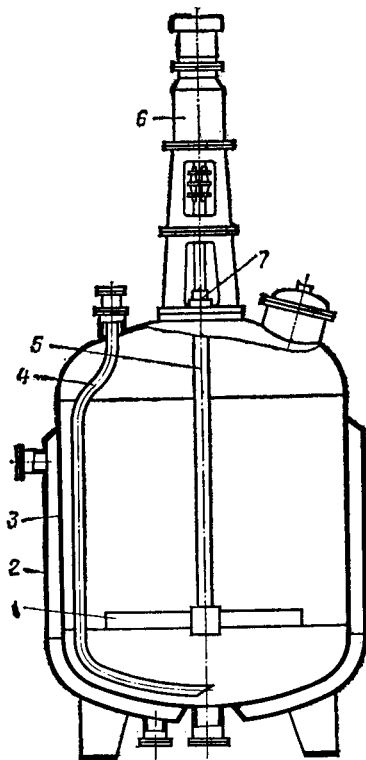


Рис. 199. Типовой аппарат с мешалкой

та. Аппараты с ней легче подвергаются очистке, однако площадь теплообмена рубашки ограничена поверхностью нижней части аппарата, а так как с увеличением размеров объем аппарата возрастает в кубе, а его наружная поверхность — в квадрате, то при больших объемах отношение поверхности рубашки к объему аппарата сильно уменьшается.

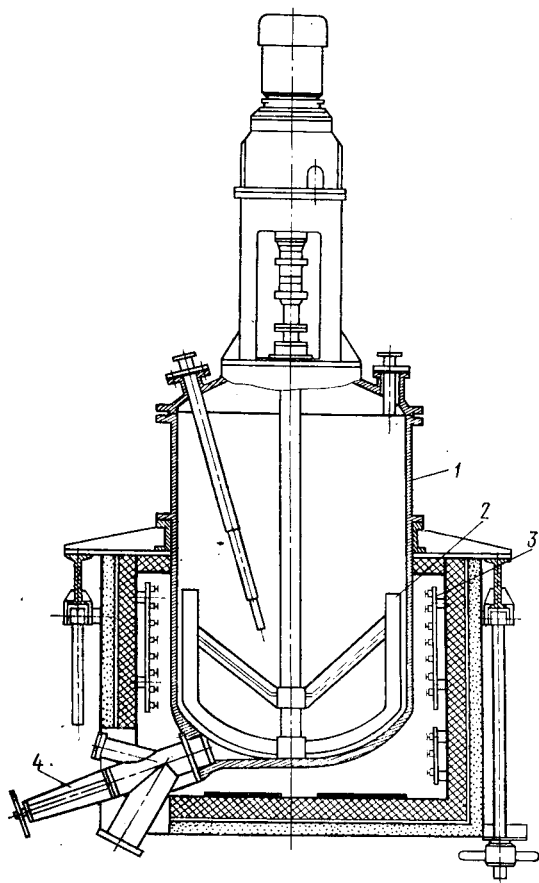


Рис. 200. Аппарат для щелочного плавления

На рис. 199 показан типовой стальной аппарат с мешалкой. Он состоит из следующих основных частей: корпуса 3, рубашки 2, мешалки 1, уплотнения 7, вала 5 и привода 6. На крышке корпуса расположены люк и штуцера для обслуживания. Аппарат имеет также ряд вспомогательных устройств — трубу передавливания 4, барботер, гильзу для термометра. Устанавливаются вертикальные емкостные аппараты в зависимости от монтажной компоновки на нижние или боковые лапы. Удаляется жидкость по трубе передавливания 4 или через нижний спуск.

Кроме аппарата, показанного на рис. 199, применяют раз-

личные конструктивные варианты. В частности, аппараты, работающие с вязкими жидкостями, имеют конические днища.

Аппараты без давления большой емкости (чаны) изготовляют с плоскими днищами и крышками, укрепленными ребрами жесткости, а под привод делают раму из балок.

На рис. 199 аппарат показан в цельносварном исполнении. Мешалка его разборная и вынимается по частям из люка. Верхнюю крышку делают съемной в небольших аппаратах, в которые невозможно влезть, а также в тех случаях, когда в аппарате имеются громоздкие неразъемные устройства (змеевики и др.) или он подлежит химзащите.

Чугунные литые аппараты находят ограниченное применение.

На рис. 200 показан чугунный аппарат для щелочного плавления, применяющийся в производстве фенола, крезолов и других аналогичных производствах.

Аппарат 1 имеет якорную мешалку 2, он очищается через вентиль нижнего спуска 4 специальной конструкции. Обогревается аппарат с помощью электроспиралей 3, закрепленных в цилиндрическом кожухе. Для удобства ремонта кожух делают опускающимся, его подвешивают на стяжках.

Аппараты с мешалками повышенного давления (более  $3,0 \text{ Н/мм}^2$ ) называют автоклавами. Ранее автоклавы изготовляли из стального литья, в настоящее время их, как правило, делают сварными. Делать верхнюю крышку автоклава съемной нецелесообразно, так как фланцевое соединение большего диаметра при повышенных давлениях получается очень тяжелым, поэтому их большей частью

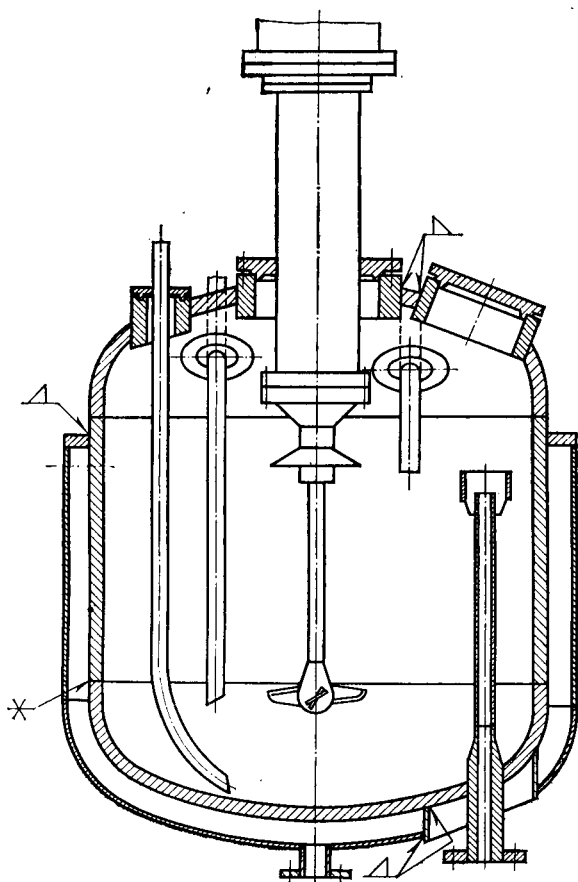


Рис. 201. Автоклав с герметичным приводом

делают цельносварными и монтируют внутренние устройства через люк или на крышке делают горловину (рис. 201), через которую вставляют мешалку небольшого диаметра.

Емкостные аппараты с мешалками предназначены для периодических процессов, однако в последнее время их применяют и для непрерывной работы. Простейший способ организации непрерывного процесса заключается в установке каскада из емкостных аппаратов, через которые последовательно перетекают реагирующие продукты. Более совершенен горизонтальный аппарат, разделенный на секции, в каждой из которых установлена своя мешалка. В подобных аппаратах, как правило, устанавливают мешалки, обеспечивающие интенсивное перемешивание. Известны, например, автоклавы непрерывного действия со всасывающими турбинными мешалками.

## § 11.2. Перемешивающие устройства

**Выбор мешалок и их характеристика.** Аппараты с перемешивающими устройствами применяют для самых различных процессов. Однако, несмотря на разнообразие технологических целей, для которых применяется перемешивание, большинство из них сводится к улучшению тепло- и массообмена, получению равномерных смесей нескольких жидкостей, жидкости и твердого тела, жидкости и газа. Основная задача перемешивания — равномерное распределение вещества или температуры в перемешиваемом объеме. Иногда перемешивание служит для эмульгирования одной жидкости в другой или диспергирования твердой фазы, а иногда для создания высоких скоростей среды около теплообменных поверхностей с целью интенсификации теплообмена. Перемешивают жидкость вращающейся мешалкой, перекачивая ее насосом по циркуляционному контуру за счет барботажа газа или пара, или ультразвуковыми, вибрационными и пульсирующими смесителями. Циркуляционное перемешивание позволяет, в частности, регулировать интенсивность перемешивания и теплообмена, однако наличие насоса и дополнительных трубопроводов усложняет схему, поэтому этот способ применяют сравнительно редко. Барботажное перемешивание малоэффективно и имеет низкий к. п. д., его обычно применяют в тех случаях, когда установка механического привода недопустима или нецелесообразна. Некоторые типы пульсационных и вибрационных перемешивающих устройств весьма перспективны, однако они пока не нашли широкого применения. Таким образом, наиболее распространенными остаются вращающиеся мешалки.

В табл. 20 показаны наиболее распространенные типы вращающихся мешалок и пределы их применения.

В зависимости от числа оборотов мешалки условно делят на тихоходные (лопастные, рамные, листовые и якорные) и быстроходные (турбинные и пропеллерные мешалки), имеющие частоту вращения более  $8 \div 10 \text{ с}^{-1}$ .

Оценка интенсивности перемешивания представляет известные трудности, так как в различных процессах с помощью перемешивания преследуют разные цели. В какой-либо степени интенсивность перемешивания определяется центробежным числом Рейнольдса

$$Re_{ц} = \rho n d_m^2 / \mu, \quad (136)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  — частота вращения мешалки, с<sup>-1</sup>;  $d_m$  — диаметр мешалки, м;  $\mu$  — вязкость, Н·с/м<sup>2</sup>.

При выборе типа мешалки и ее параметров учитывают требования процесса, свойства жидкости (вязкость, наличие осадков и др.), форму аппарата и другие факторы. В настоящее время отсутствуют единые критерии для выбора мешалки. Во многих случаях нельзя указать вполне определенно, какой именно тип мешалки наилучший для данного процесса. При выборе руководствуются производственным опытом или лабораторными исследованиями.

**Лопастные мешалки.** Их относят к группе тихоходных. Недостаток — малая интенсивность перемешивания и отсутствие значительных вертикальных потоков, вследствие чего их не рекомендуется применять для взвешивания тяжелых осадков и работы с расслаивающимися жидкостями. Несмотря на это, лопастные мешалки широко применяют для различных процессов и в аппаратах значительного объема. Они просты по конструкции, обеспечивают удовлетворительное перемешивание при работе с вязкими жидкостями. Для улучшения осевого перемешивания жидкости применяют лопастные мешалки с наклонными лопастями.

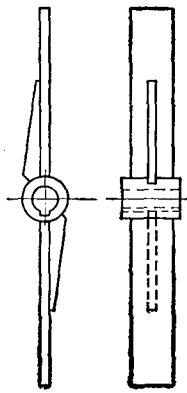
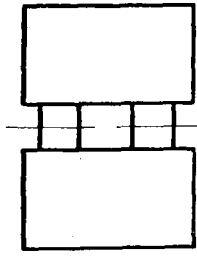
**Рамные мешалки.** Их рассматривают как разновидность лопастных, состоящих из двух горизонтальных лопастей, соединенных несколькими вертикальными планками. Эти мешалки применяют для аппаратов большой емкости (до 100 м<sup>3</sup>). Они обеспечивают удовлетворительное перемешивание жидкостей с большой вязкостью.

**Якорные мешалки.** Применяют для обработки вязких, загрязненных и застывающих жидкостей. Профиль мешалки повторяет очертания аппарата, зазор между стенками аппарата и мешалкой делают минимальным. Лопасты такой мешалки создают интенсивное перемешивание непосредственно около стенок и очищают их от налипших осадков, если таковые имеются. Для особо вязких жидкостей применяют якорные мешалки с дополнительными вертикальными или наклонными планками. Общие недостатки всех тихоходных мешалок: громоздкость, значительные пусковые перегрузки, необходимость применения редукторов с большим передаточным отношением.

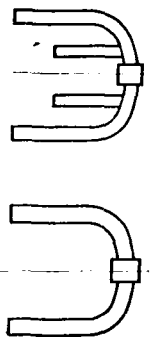
**Листовые мешалки.** Применяют сравнительно редко, в основном для маловязких жидкостей. Для улучшения перемешивания в мешалке делают отверстия.

**Турбинные мешалки.** Их относят к быстроходным, работающим по принципу центробежного насоса, т. е. они всасывают жидкость в середину и за счет центробежной силы отбрасывают ее к

Таблица 20

| Тип мешалки                                                                                          | Возможная область применения                                                                                                                                   | Отношение<br>размера<br>мешалки<br>к диаметру<br>аппарата | Окружная<br>скорость конца<br>мешалки, м·с | Вязкость<br>перемешивае-<br>мой среды, сП |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <p>Лопастные</p>  | <p>Перемешивание. Растворение жидкостей, эмульгирование, медленное растворение твердых веществ, взмучивание легких осадков, выравнивание температуры среды</p> | <p>0,55÷0,7</p>                                           | <p>1,5÷5</p>                               | <p>1÷3000</p>                             |
| <p>Листовые</p>   | <p>Перемешивание, растворение жидкостей малой вязкости, взвешивание твердого вещества, интенсификация теплообмена</p>                                          | <p>0,5</p>                                                | <p>0,7÷5</p>                               | <p>1÷50</p>                               |

Якорные

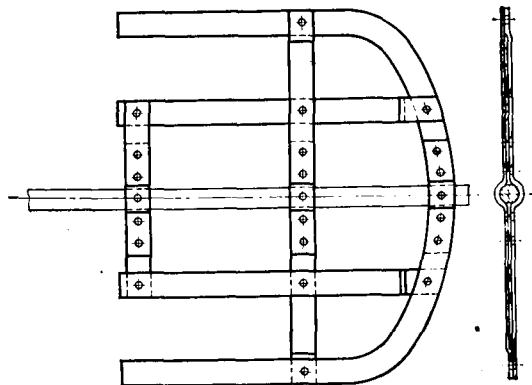


Перемешивание вязких и тяжелых жидкостей, предотвращение выпадения осадка на стенках и дне, суспендирование в вязких средах

$0,5 \div 4,5$

$1 \div 10000$

Рамные

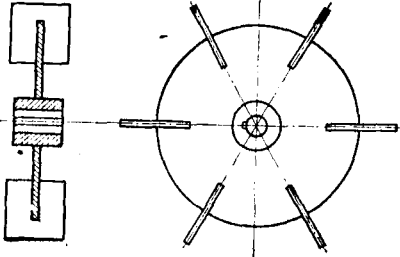


В основном в тех же случаях, что и якорные

$0,5 \div 5$

$0,65 \div 0,8$

$1 \div 10\ 000$

| Тип мешалки                                                                                                                                       | Возможная область применения                                                                                                      | Отношение<br>размера<br>мешалки<br>к диаметру<br>аппарата      | Окружная<br>скорость конца<br>мешалки, м/с                | Вязкость<br>перемешиваемой<br>среды, сП                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <p data-bbox="259 1070 284 1360">Турбинные открытого типа</p>  | <p data-bbox="259 480 336 960">Перемешивание, растворение жидкостей, суспендирование, эмульгирование, выравнивание температур</p> | <p data-bbox="259 340 284 461"><math>0,25 \div 0,33</math></p> | <p data-bbox="259 234 284 309"><math>25 \div 9</math></p> | <p data-bbox="259 60 284 166"><math>1 \div 40\,000</math></p> |

Турбинные закрытого типа



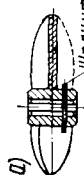
Перемешивание, растворение жидкостей, суспендирование, перемешивание в процессах растворения газа, в процессах экстракции, перемешивание жидкостей различного удельного веса

0,25 ÷ 0,33

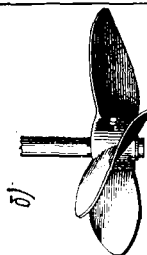
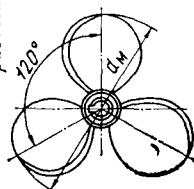
2,5 ÷ 12

1 ÷ 40 000

Пропеллерные



Шпильки  
разбойной



Перемешивание, растворение, эмульгирование, взмучивание осадков с весовым содержанием твердого вещества до 10%, выравнивание температуры

0,25 ÷ 0,33

3,6 ÷ 16

1 ÷ 40 000

периферии. Таким образом, в отличие от лопастных, рамных и якорных мешалок, сообщающих жидкости в основном круговое движение, турбинные сообщают радиальное. Турбинные мешалки делают открытыми и закрытыми. По конструкции закрытые мало отличаются от колеса центробежного насоса и подразделяются на мешалки одностороннего и двустороннего всасывания. Открытая мешалка представляет собой диск с радиально расположенными лопатками, она более проста по конструкции и поэтому чаще применяется. Турбинные мешалки обеспечивают весьма интенсивное перемешивание. Их можно применять при широком диапазоне вязкостей и плотностей перемешиваемых жидкостей, для подъема тяжелых суспензий, получения эмульсий, при химических процессах и др. Не рекомендуется применять турбинные мешалки для аппаратов большой емкости. В аппаратах с турбинными мешалками обязательна установка отражательных перегородок, если они отсутствуют, то образуется глубокая воронка, иногда доходящая до дна аппарата, и перемешивание ухудшается. Обычно устанавливают четыре перегородки в виде радиально расположенных вертикальных планов шириной не более  $0,1D$ , где  $D$  — диаметр аппарата.

Пропеллерные мешалки. Особенность их работы — значительные осевые потоки жидкости. Расстояние между двумя соседними витками винтовой линии на среднем диаметре мешалки называют *шагом* винта:  $s = \pi d_{\text{ср}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{ср}}$ , где  $d_{\text{ср}}$  — средний диаметр мешалки;  $\alpha_{\text{ср}}$  — угол подъема лопасти на среднем диаметре. Чем больше угол подъема лопасти, тем значительнее осевые потоки, но одновременно возрастает расход мощности на перемешивание. Пропеллерные мешалки применяют для химических процессов растворения, эмульгирования, взмучивания и во многих других случаях. Для упорядочения потоков жидкости в аппарате и увеличения насосного действия пропеллерной мешалки ее целесообразно устанавливать внутри диффузора (направляющей трубы). Применяют различные виды пропеллерных мешалок: в некоторых случаях их конструируют по типу воздушных пропеллеров с узкими лопастями, в других — по типу судовых гребных винтов с лопастями овальной формы. Некоторые конструкции пропеллерных мешалок имеют лопасти с прямыми кромками. Для того чтобы сохранить одинаковый шаг винта по всей длине лопасти, раньше мешалки изготавливали с изогнутыми лопастями, т. е. уменьшали угол наклона лопасти по мере увеличения диаметра; в настоящее время мешалки в некоторых случаях делают с прямыми лопастями, что существенно облегчает их изготовление. Пропеллерные мешалки не применяют в аппаратах с плоским дном, так как в углах образуются застойные зоны.

При классификации мешалок необходимо учитывать не только их форму, но и создаваемые ими потоки. Например, лопастная мешалка с прямыми лопастями при большом числе оборотов создает значительные радиальные потоки, т. е. работает как турбинная. Лопастная мешалка с наклонными лопастями при большом числе оборотов и значительном угле наклона лопастей приближается по своему режиму работы к пропеллерным.

Мешалки обычно устанавливают по оси аппарата, однако практика показывает, что небольшой эксцентриситет при установке мешалок не сказывается сколько-нибудь существенно на качестве перемешивания. В сосудах большой емкости устанавливают несколько валов с мешалками, располагая их равномерно по площади аппарата. В тех случаях, когда требуется не столь интенсивное перемешивание, а лишь незначительная циркуляция жидкости в большом объеме, возможна установка мешалки сбоку аппарата. Если высота аппарата велика по сравнению с его диаметром, то на одном валу устанавливают несколько мешалок (две, три, а иногда и четыре).

**Конструирование и изготовление мешалок.** Мешалки изготавливают из различных металлических и неметаллических материалов,

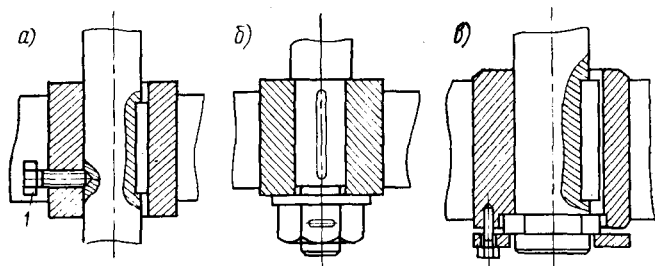


Рис. 202. Способы крепления мешалок на валу

обладающих достаточной механической прочностью. Наиболее распространены стальные сварные перемешивающие устройства. Мешалки сложной конфигурации отливают из чугуна. Реже для их изготовления применяют цветные металлы и пластмассы.

В простейших конструкциях лопасти приваривают непосредственно к валу. Однако, как правило, рабочие элементы крепятся на валу с помощью разъемных соединений.

Мешалка — это ступица с приваренными к ней лопастями. Ступицу крепят на валу с помощью шпонки и стопорных устройств, препятствующих осевому смещению. В случае установки мешалки в середине вала ее закрепляют стопорным винтом (рис. 202, а), при установке на конце вала — концевой гайкой (рис. 202, б) или с помощью двух полуколец, которые закладываются в кольцевую выточку на валу (рис. 202, в).

При конструировании мешалок необходимо учитывать условия их монтажа. Мешалки небольших аппаратов (диаметром  $\leq 1200$  мм) должны иметь минимум разъемных соединений, поэтому их собирают и устанавливают в аппарат вместе с крышкой. Мешалки для крупногабаритных аппаратов целесообразно делать разъемными из частей таких размеров, которые можно пронести через лаз аппарата. Это дает возможность разбирать мешалку при ремонтных и монтажных работах, не снимая крышку и привод. В цельносварных аппаратах мешалка обязательно должна быть разборной.

Простейшая лопастная мешалка имеет две прямоугольные лопасти, которые при значительных нагрузках соединяют ребрами жесткости со ступицей. Рамная мешалка, показанная в табл. 20, состоит из отдельных разъемных частей. Открытые турбинные мешалки выполняют сварными. Лопасти приваривают к диску, который в свою очередь сварен со ступицей. Если мешалка имеет боль-

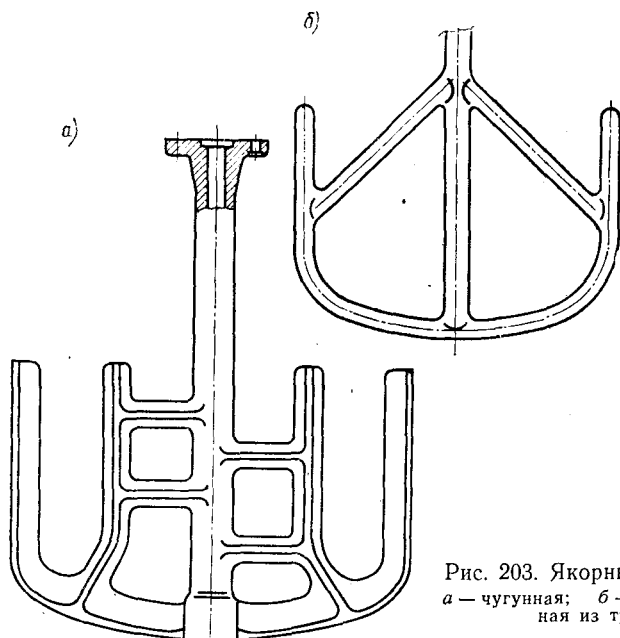


Рис. 203. Якорные мешалки:  
а — чугунная; б — эмалированная из труб

шие размеры (более 600 мм), то две противоположно расположенные лопасти делают съемными, чтобы иметь возможность монтировать мешалку через люк диаметром 500÷600 мм.

Пропеллерные мешалки изготавливают сварными или литыми. С помощью отливки изготавливают закрытые турбинные и якорные мешалки. Чугунные якорные мешалки (рис. 203, а) оканчиваются фланцем, с помощью его они соединяются со стальным валом.

Применение неметаллических материалов для мешалок ограничено их низкой механической прочностью. Более распространены стальные мешалки, защищенные антикоррозионными покрытиями, или комбинированные из стального вала и неметаллических лопастей. Конструкция мешалок, подлежащих защите, должна быть удобна для нанесения покрытия (форма по возможности проста, острые углы сглажены). На рис. 203, б показана эмалированная мешалка, выполненная из трубы.

При конструировании разъемных мешалок с антикоррозионным покрытием необходимо обеспечивать надежную защиту мест разъема. Удачна в этом отношении конструкция разборной гуммирован-

ной мешалки с наклонными лопастями (рис. 204). К валу мешалки приваривают ступицу в виде четырехгранной усеченной пирамиды, которая гуммируется вместе с валом. На ступицу насаживают гуммированную лопасть, втулка которой также имеет форму усеченной пирамиды. Осевое давление жидкости и сила веса

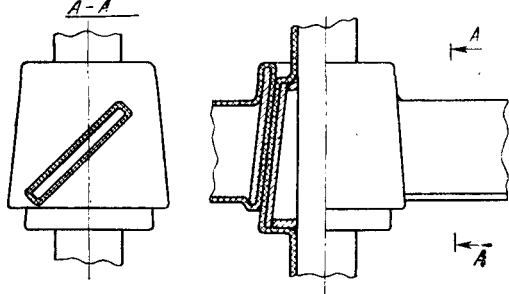


Рис. 204. Разборная гуммированная мешалка

мешалки прижимают лопасть к ступице. Мешалка вращается только в одном направлении, при котором вертикальный поток жидкости направлен снизу вверх. Данная конструкция может иметь несколько пар лопастей. Размер нижней ступицы тогда делают больше, чем верхней, чтобы обеспечить монтаж нижней лопасти.

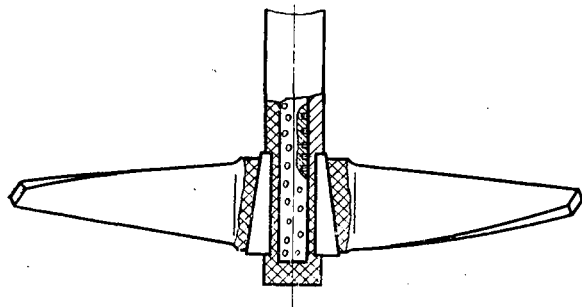


Рис. 205. Разборная фенолитовая мешалка

На рис. 205 показана фенолитовая мешалка — стальной вал, который защищен фенолитом. Для лучшего сцепления фенолитового покрытия с валом на нем высверливают отверстия. На боковой поверхности вала в слое фенолита фрезеруют канавки, в которые закладывают клиновые фенолитовые шпонки.

На шпонки надевают мешалку с наклонными лопастями, которая прижимается к шпонке за счет силы веса и осевого давления жидкости (так же как и в гуммированной лопастной мешалке, рассмотренной выше).

При изготовлении мешалок следует соблюдать симметрию лопастей. Быстроходные мешалки (пропеллерные и турбинные) балансируют. Окончательную балансировку мешалок с антикоррозионной защитой производят после нанесения защитного слоя.

**Мешалки специальных типов.** Наряду с перечисленными мешалками массового применения в различных отраслях промышленности изредка применяют мешалки специфических конструкций, например всасывающие (импеллерные) мешалки, обеспечивающие хороший контакт газа с жидкостью при одновременном интенсивном перемешивании (рис. 206). Вал мешалки помещен внутри трубы 1, по которой подается воздух под небольшим избыточным давлением (в некоторых конструкциях воздух всасывается при вращении ме-

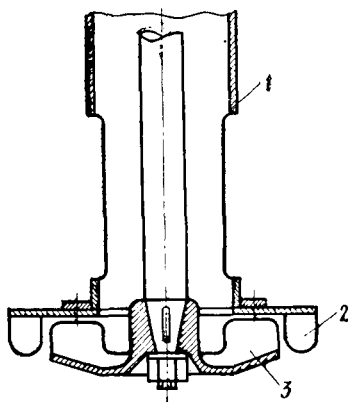


Рис. 206. Импеллерная мешалка

шалки). На мешалке имеется ряд лопастей 3, а на конце трубы установлен статор с лопастями 2. Наличие двух рядов лопастей, подвижного и неподвижного, обеспечивает хорошее перемешивание жидкости и газа. Для перемешивания особо вязких жидкостей применяют планетарные мешалки. Лопасти их совершают сложное движение: вращение вокруг собственной оси и вращение вала мешалки вокруг оси аппарата. Сложение этих двух движений приводит к тому, что лопасти описывают сложную траекторию. Недостаток планетарных мешалок — сложная конструкция привода.

**Расчет мешалок.** Он заключается в определении потребляемой мощности, выборе двигателя, прочностном расчете мешалки и вала.

Расчет мощности, потребляемой мешалкой, подробно изложен в курсе «Процессы и аппараты химической технологии», а также в специальной литературе. В настоящей книге будут рассмотрены только отдельные вопросы, касающиеся определения мощности.

Номинальная мощность (Вт), потребляемая мешалкой,

$$N_0 = k_N \rho n^3 d_m^5, \quad (137)$$

где  $k_N$  — критерий мощности, величину которого выбирают по соответствующим таблицам и номограммам в зависимости от типа мешалки и центростремительного числа Рейнольдса;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  — частота вращения мешалки, об/с;  $d_m$  — диаметр мешалки, м.

Из (137) следует, что даже незначительное увеличение числа оборотов или диаметра мешалки приводит к резкому повышению потребляемой мощности. Установка вертикальной трубы с диаметром 50 мм увеличивает мощность на 10÷20%. Установка отражательных перегородок в несколько раз увеличивает мощность турбинных и пропеллерных мешалок. Влияние внутренних устройств учитывается соответствующим выбором коэффициента  $k_N$  или введением дополнительных повышающих коэффициентов. Мощность двигателя (кВт)

$$N = k_1 [N_0 (1 + \sum k) + N_c] / \eta, \quad (138)$$

где  $k_1$  — коэффициент перегрузки при пуске [для быстроходных мешалок  $k_1=1,0$ ; для тихоходных (лопастных, рамных и якорных) мешалок  $k_1=1,3$ ];  $\sum k$  — сумма повышающих коэффициентов, связанных с различными внутренними устройствами в аппарате (для змеевика  $k=1$ , для трубы перекачивания — 0,1, для второй пары лопастей — 0,5);  $N_0$  — мощность, потребляемая мешалкой, кВт;  $N_c$  — потери на трение в уплотнениях вала, кВт;  $\eta$  — к. п. д. привода.

Мощность, расходуемая на трение в сальнике для уплотнения с мягкой набивкой,

$$N_c = 1,48 f n d^2 l p, \quad (139)$$

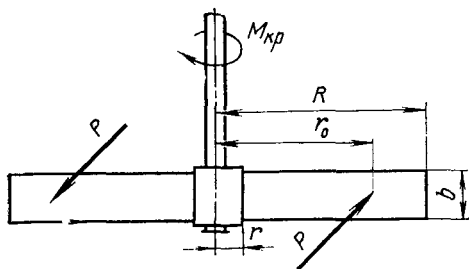


Рис. 207. Схема нагрузок на двухлопастную мешалку

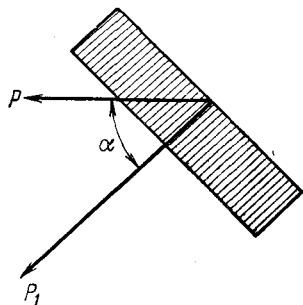


Рис. 208. Усилия, действующие на наклонную лопасть

где  $f=0,2$  — коэффициент трения вала по мягкой набивке;  $d$  — диаметр вала, м;  $l$  — длина набивки, м;  $p$  — рабочее давление в аппарате, Н/м<sup>2</sup>.

Лопастей мешалки рассчитывают на изгиб. Для лопастей прямоугольной формы (рис. 207) равнодействующая сил сопротивления приложена в точке, расстояние которой от оси

$$r_0 = \frac{3}{4} \frac{R^4 - r^4}{R^3 - r^3}, \quad (140)$$

где  $R$  — радиус лопасти;  $r$  — радиус ступицы.

Величина равнодействующей

$$P = M_{кр}/(r_0 z), \quad (141)$$

где  $M_{кр}$  — крутящий момент на валу мешалки;  $z$  — число лопастей на валу.

Для наклонной лопасти (рис. 208) сила, действующая перпендикулярно плоскости лопасти,  $P_1 = p/\cos \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона лопасти.

Изгибающий момент у основания лопасти

$$M_{изг} = p(r_0 - r). \quad (142)$$

Из условия прочности определяют момент сопротивления лопасти

$$w = M_{изг}/[\sigma]. \quad (143)$$

Для лопасти прямоугольного сечения момент сопротивления  $w = bs^2/6$ .

Отсюда толщина лопасти

$$s = \sqrt{6w/b}. \quad (144)$$

При расчете мешалок с ребрами жесткости предварительно выбирают толщину мешалки и размеры ребра, затем определяют момент сопротивления составного сечения и сравнивают его с необходимым моментом сопротивления. Мешалки сложной формы раз-

бывают на несколько участков, определяют усилия, действующие на них, и рассчитывают напряжения в опасных сечениях. Необходимо иметь в виду, что в некоторых мешалках на отдельных участках кроме изгибающих моментов могут действовать и крутящие моменты.

### § 11.3. Приводы мешалок

*Приводом мешалки* называют электродвигатель с передачей, установленный на вертикальной стойке.

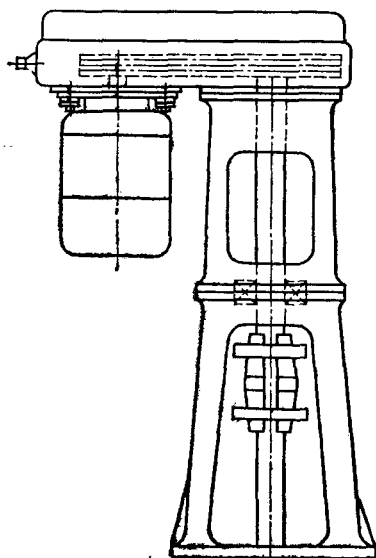


Рис. 209. Привод с клиноременной передачей

Быстроходные мешалки — пропеллерные и турбинные — при значительном числе оборотов ( $30 \div 50 \text{ с}^{-1}$  и выше) соединяются с электродвигателем через клиноременную передачу (рис. 209), а в некоторых случаях они могут быть установлены и на одном валу с электродвигателем. Однако обычно привод осуществляется от электродвигателя через редуктор.

Ранее применялись редукторы с червячной или конической передачей (рис. 210, а, б). В настоящее время их применение ограничено, а используют, как правило, редукторы с цилиндрической или планетарной (рис. 210, в) передачей и с вертикальным фланцевым электродвигателем (рис. 210, г). Планетарный мотор — редуктор МПО — серийно производится в СССР. Он компактен, имеет хорошие характеристики

и выпускается в широком диапазоне мощностей и чисел оборотов.

На рис. 211, г показан привод с низкой стойкой. Данная компоновка при небольшой высоте создает благоприятные условия для работы подшипников.

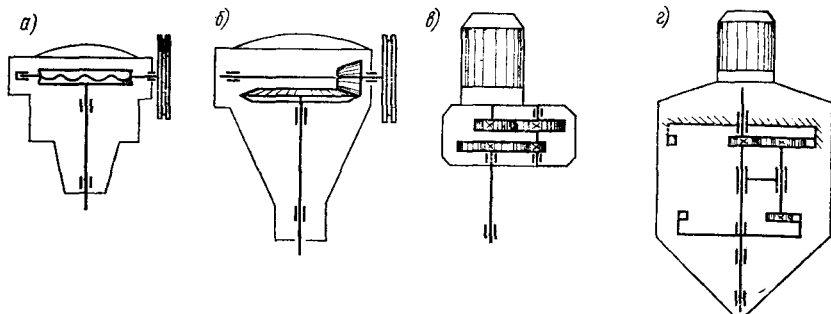


Рис. 210. Кинематические схемы приводов мешалок

Приводы мешалок устанавливают на стойку (чугунную или стальную сварную), которую, в свою очередь, крепят к аппарату, для этого к его крышке приваривают «пластики» (толстые пластины). При конструировании дополнительных подшипников для вала мешалки и стоек под приводы необходимо учитывать, что на мешалки действуют значительные радиальные усилия. В быстроходных мешалках они возникают в основном за счет динамических нагрузок; в громоздких тихоходных они появляются вследствие волнообразования в жидкости. В том случае, когда подобные тяжело нагруженные валы присоединяли непосредственно к приводу (рис. 211, а), часто происходила поломка вала, быстрый износ подшипников привода или выход из строя сальника, который не рассчитан на радиальные нагрузки. Для улучшения условий работы вала мешалки устанавливают концевой подшипник (подпятник) или промежуточные подшипники в верхней части вала (рис. 211, б, в). Промежуточные подшипники устанавливают внутри стойки, высота которой значительно увеличивается. Однако иногда целесообразно пойти на увеличение габаритов аппарата, чтобы обеспечить нормальную работу перемешивающего устройства.

С точки зрения распределения нагрузок наиболее рациональны приводы с концевыми подшипниками, однако иногда из-за коррозионного или абразивного действия среды их нельзя устанавливать. Концевые подшипники (рис. 212) в аппарате работают в тяжелых условиях: их невозможно смазывать, они плохо доступны для ос-

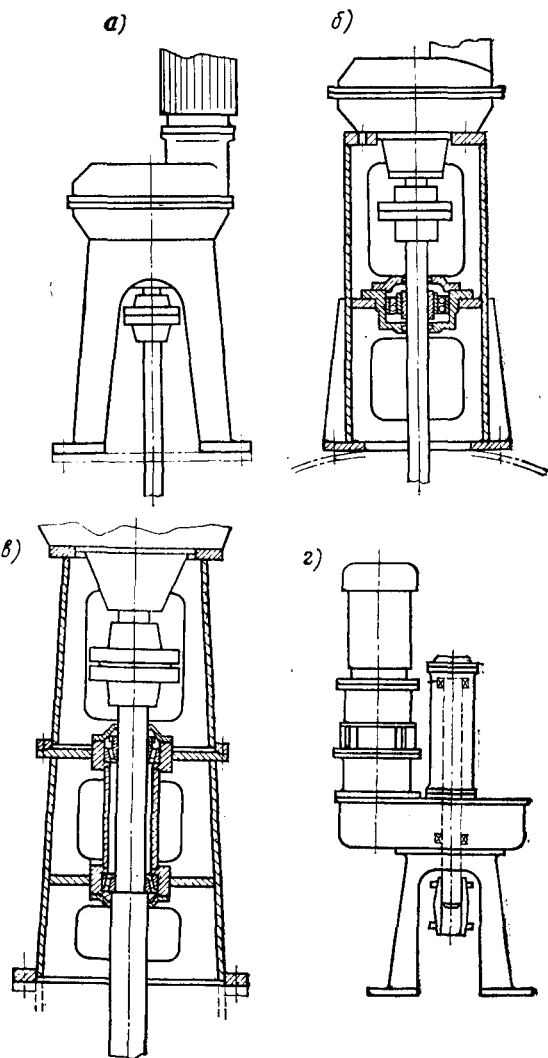


Рис. 211. Конструктивные схемы установки приводов

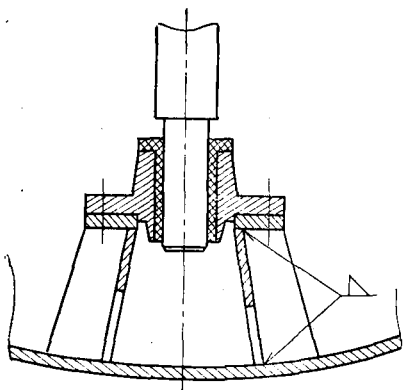


Рис. 212. Концевой подшипник

слева). Привод без промежуточных подшипников рассчитывают по графику *a*, причем верхнюю часть вала, лежащую в подшипниках редуктора, считают жестко закрепленной. Приводу с одним промежуточным подшипником соответствует график, изображенный на рис. 213, *б* с двумя промежуточными подшипниками и упругой муфтой, соединяющей вал с редуктором, — график, показанный на рис. 213, *в*. Концевой подшипник рассматривают как шарнирную опору (рис. 213, *г*). Сальниковые уплотнения не считают опорным подшипником, хотя в некоторых случаях они воспринимают часть нагрузки.

Критическое число оборотов

$$\omega_{кр} = (\alpha^2/L^2) \sqrt{EJ/m_b}, \quad (146)$$

где  $\alpha$  — корень уравнения критических скоростей;  $L$  — длина вала, м;  $E$  — модуль упругости материала вала, Н/м<sup>2</sup>;  $J$  — момент инерции сечения вала, м<sup>4</sup> (для сплошного вала  $J = \pi d^4/64$ );  $m_b$  — масса единицы длины вала, кг/м.

Величину  $\alpha$  определяют по графикам, данным на рис. 213, в зависимости от схемы нагрузки и соотношений  $a = l_1/L$  и  $K = m/(m_b L)$ , где  $m$  — масса мешалки, кг.

Фактическая частота вращения не должна превышать 0,55 от критического ( $\omega < 0,55 \omega_{кр}$ ).

Для того чтобы уменьшить длину вала, аппараты большой высоты иногда изготавливают с нижним приводом, а вал вводят через сальник в днище аппарата, благодаря чему мешалка, находящаяся в его нижней части, имеет сравнительно короткий вал. Несмотря на преимущества данной конструктивной схемы, она не получила широкого распространения, так как привод и сальник неудобны в обслуживании и трудно устранить течи через уплотнение вала.

При расчете подшипников привода необходимо учитывать значительные осевые усилия, действующие на вал, особенно в аппара-

мotra и ремонта. Конструкция подпятника должна обеспечивать свободную циркулирующую жидкости через него. В футерованных аппаратах концевые подшипники, как правило, не устанавливают.

Вал мешалки рассчитывают на кручение:

$$d = \sqrt[3]{M_{кр}/(0,2[\tau])}. \quad (145)$$

Величина допускаемого напряжения для стальных валов  $[\tau] \leq 45$  Н/мм<sup>2</sup>. Валы быстроходных мешалок на критическое число оборотов проверяют по следующей методике. Сначала выбирают расчетную схему (рис. 213,

тах, работающих при повышенных давлениях. Осовая сила (направленная вверх)

$$P = \pi d^2 / 4 - Q + p_{ос}, \quad (147)$$

где  $p$  — давление в аппарате (если в аппарате вакуум, значение берут с минусом);  $d$  — диаметр вала при наличии сальника или

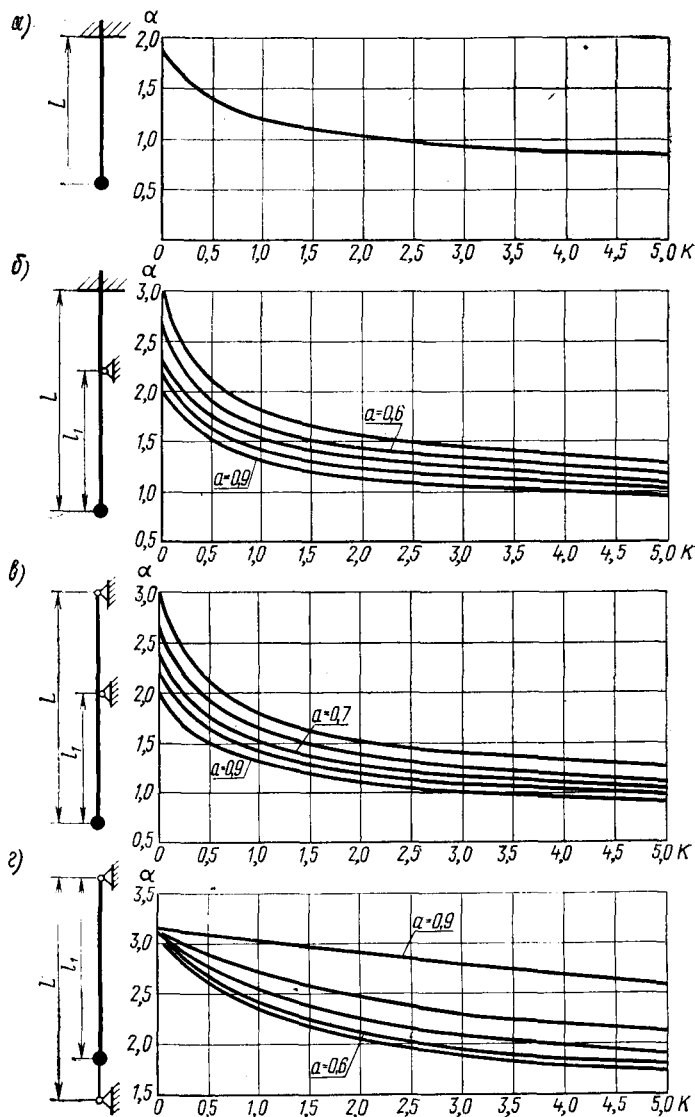


Рис. 213. Графики для расчета мешалок на критическое число оборотов

средний диаметр уплотнительного кольца при наличии торцового уплотнения;  $Q$  — вес вала, мешалки и муфты;  $P_{ос}$  — осевая сила, создаваемая мешалкой (направленная вверх).

#### § 11.4. Уплотнение вращающихся валов

Назначение уплотнений — не допускать или по возможности уменьшать пропуск среды в месте ввода в аппарат движущихся частей. Несмотря на то что узел уплотнения занимает сравнительно небольшую часть аппарата, от него зачастую зависит качество работы всей установки. Это особенно относится к производствам с ядовитыми и взрывоопасными веществами и к аппаратам, работающим под вакуумом. Для вращающихся валов используют сальники, торцовые и лабиринтные уплотнения. Лабиринтные уплотнения для приводов мешалок применяют крайне редко. До недавнего времени были распространены сальники с набивкой, которые разделяются на сальники без натяжения и с осевым натяжением. Сальники без натяжения применяют для уплотнения подшипников и корпусов мельниц. Они не обеспечивают уплотнения даже при небольшой разности давлений. Сальники с осевым натяжением применяют для широкого диапазона давлений, чисел оборотов вала и температур. Простейший сальник (рис. 214, а) состоит из корпуса, нажимной крышки, втулки, натяжных шпилек и сальниковой набивки. Чистота обработки вала под сальниковое уплотнение должна быть высокой. Втулку обычно изготавливают из мягкого материала, чтобы соприкасающийся с ней вал меньше изнашивался. Поверхности втулки и нажимной крышки, обращенные к набивке, делают коническими для того, чтобы при нажатии на крышку набивка прижималась к валу. Нажимная крышка имеет круглый или овальный фланец. В настоящее время отсутствуют твердые технически обоснованные нормы для конструирования сальников, поэтому основные размеры определяют на основании эмпирических формул. Толщина сальниковой набивки в миллиметрах  $s = (1,5 \div 2,5) \sqrt{d}$ , где  $d$  — диаметр вала, мм.

Полученное значение  $s$  округляют по следующим стандартным размерам сечения набивки: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 32, 35, 38, 42 и 50 мм. Высота сальниковой коробки  $h = 5 \div 8s$  (для высоких давлений  $10 \div 12s$ ). При увеличении высоты сальника повышается его герметичность, но возрастают потери на трение. Высота цилиндрической части нажимной крышки  $h_1 = 0,4 \div 0,5h$ .

Сальники устанавливают обычно на бобышках. Сальниковая коробка может находиться вне аппарата или быть утоплена внутрь (рис. 214, б). Хотя сальник, утопленный в аппарат, и позволяет несколько уменьшить высоту привода, эту конструкцию нельзя признать удачной, так как обслуживание его затрудняется. Особенно нежелательно применять утопленные сальники при высокой температуре в аппарате. При высокой температуре среды или значительном выделении тепла за счет трения сальник охлаждают с помощью водяной рубашки (рис. 124, в).

В тех случаях, когда стремятся по возможности полностью исключить пропуск среды через сальниковое уплотнение, применяют сальники сложной конструкции. Например, когда в аппарате ядовитая среда, используют сальники с противодавлением, для чего набивку разделяют кольцами и в пространство около колец вводят инертный газ под давлением несколько большим, чем в аппарате, который препятствует выходу ядовитого газа из аппарата.

Иногда раздельное кольцо используют для смазки сальника, причем масло может одновременно служить гидравлическим затвором, не пропускающим среду. На рис. 214, г показан сальник

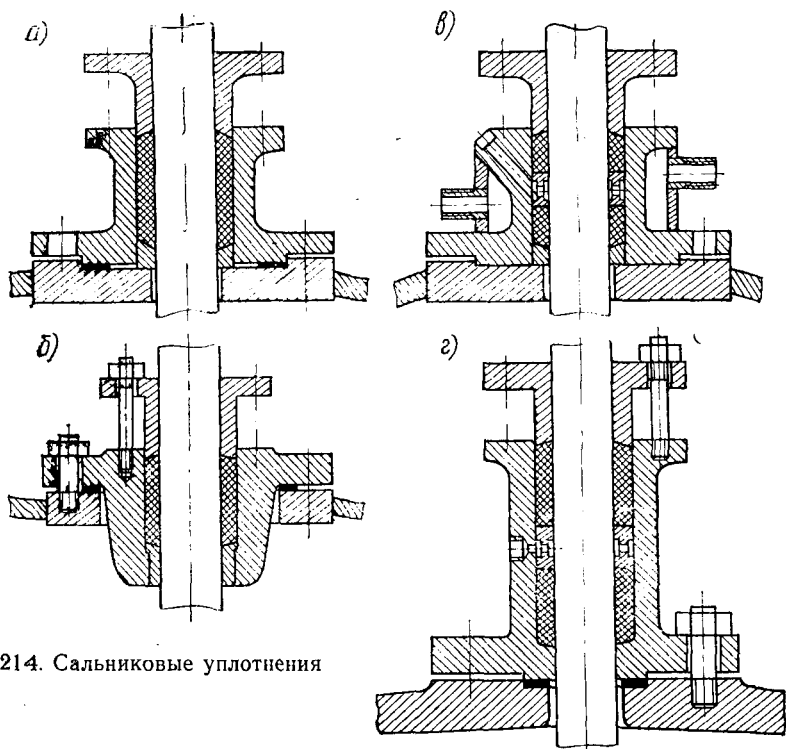


Рис. 214. Сальниковые уплотнения

автоклава высокого давления, масло в кольцо которого подается из специальной масленки за счет давления в самом аппарате. При конструировании сальникового уплотнения необходимо предусмотреть хороший доступ к нему для удобства смены набивки. В качестве набивок широко применяют асбестовые или хлопчатобумажные шнуры круглого или квадратного сечения, пропитанные маслами, воском, синтетическими материалами или графитом. Большой прочностью и непроницаемостью обладают прорезиненные сальниковые шнуры. Их недостаток состоит в том, что они требуют постоянной смазки. При больших числах оборотов, высоких давлениях и температурах используют сальники с твердой набивкой,

выполненной в виде разрезных колец, из цветного металла, твердых пластмасс или прессованных графитов. Набивки из фторопласта обладают хорошими антифрикционными свойствами и высокой химической стойкостью. Фторопласт применяют в виде стружки или тонких колец. Широко применяют фторопластовые уплотнительные материалы ФУМ, которые выпускают в виде мягкого шнура или полос. Несмотря на широкое распространение, сальниковые уплотнения имеют ряд недостатков, а именно — они требуют постоянного надзора (крышку надо периодически подтягивать, а набивку — менять), даже в сальниках сложной конструкции устранить пропуски бывает трудно. Поэтому в настоящее время широко применяют более совершенные торцовые уплотнения [9].

Торцовое уплотнение состоит из двух колец — подвижного и неподвижного, которые прижимаются друг к другу по торцовой поверхности с помощью пружины. Торцовые уплотнения имеют следующие достоинства: 1) в отличие от сальников при нормальной работе не требуется их постоянного обслуживания; 2) правильно подобранные торцовые уплотнения отличаются большой износоустойчивостью и, следовательно, долговечностью; 3) торцовые уплотнения обладают высокой герметичностью. Самый ответственный элемент торцового уплотнения — пара трения. Качество уплотнения и надежность его работы зависят в основном от материала и качества обработки поверхностей трущихся колец. Одно из колец изготавливают из менее твердого материала — графита, другое — из кислотостойкой стали, бронзы или твердой резины. Для колец торцовых уплотнений применяют также фторопласт-4 и керамику. Керамические кольца обладают химической стойкостью и износоустойчивостью; их недостаток — склонность к растрескиванию.

На рис. 215 показано простейшее, одинарное торцовое уплотнение. Подвижное кольцо 3 крепится к втулке, закрепленной на валу. Неподвижное кольцо 2 связано с корпусом с помощью гибкого элемента — сильфона 1. Кольца прижимаются друг к другу с помощью пружин, показанных схематически. Силу прижатия колец выбирают в зависимости от давления в аппарате. Трущиеся поверхности должны быть смазаны, поэтому их помещают в смазочную ванну. В этой конструкции имеется охлаждающая рубашка, но при малых тепловыделениях охлаждение можно осуществлять с помощью самой смазки. Более совершенным является двойное торцовое уплотнение с двумя парами колец. Пространство между кольцами образует промежуточную полость, в которую под давлением несколько большим, чем в аппарате, подается запирающая жидкость. Благодаря наличию промежуточной полости полностью исключается прорыв среды через уплотнение.

В корпус уплотнения, показанного на рис. 216, вмонтирован подшипник, что облегчает условия работы вала. В качестве смазки торцовых уплотнений применяют дистиллированную воду, машинное масло, глицерин, этиленгликоль, а также другие жидкости, близкие к перечисленным по свойствам. Необходимо считаться с тем, что незначительное количество смазочной жидкости (до

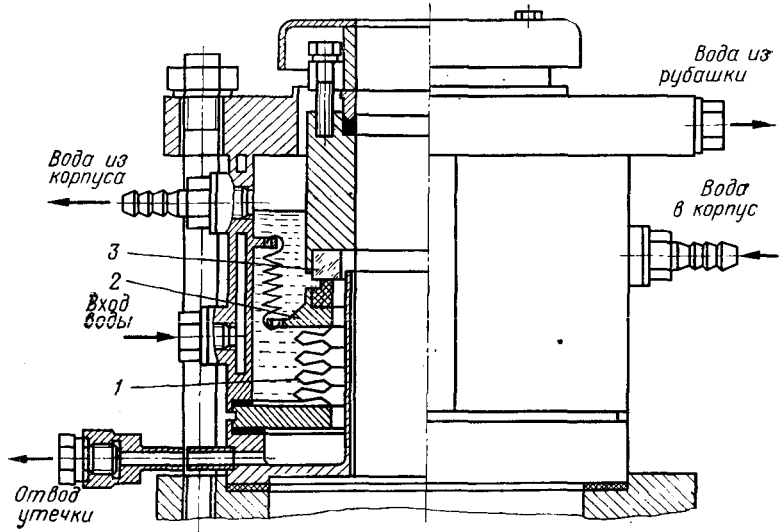


Рис. 215. Одинарное торцовое уплотнение

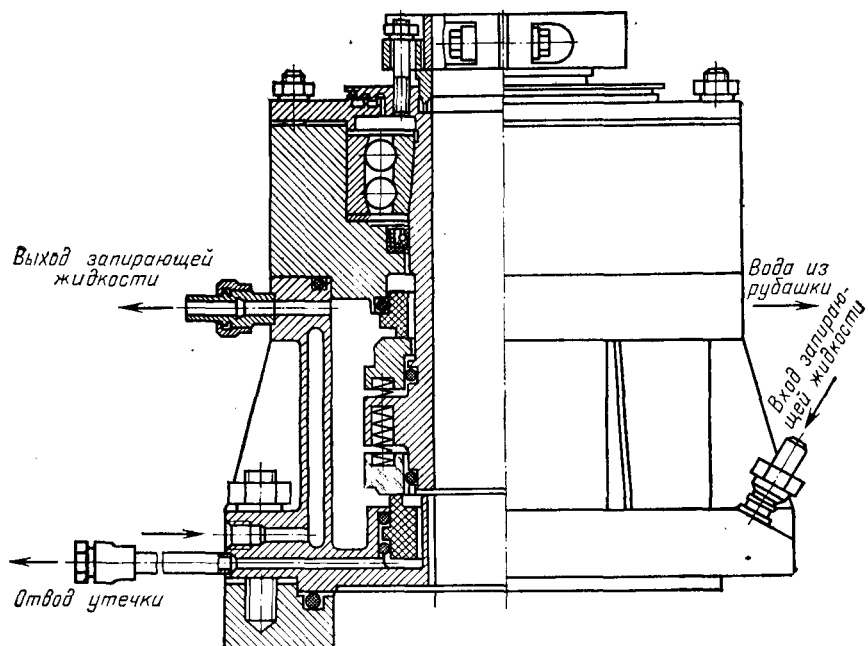


Рис. 216. Двойное торцовое уплотнение

10 см<sup>3</sup>/ч) может попадать в аппарат. Подача запирающей (смазочной) жидкости может быть принудительной (с помощью циркуляционного насоса) или с естественной циркуляцией. При естественной циркуляции запирающую жидкость заливают в бачок-аккумулятор емкостью 20÷40 л. К верхней части аккумулятора подводят давления из аппарата. Бачок поднимают на 2÷3 м над торцовым уплотнением, и гидростатический столб жидкости обеспечивает ее подачу в уплотнение. Для охлаждения и очистки запирающей жидкости на линии устанавливали фильтр и теплообменник.

Торцовые уплотнения на давление до 3,2 Н/мм<sup>2</sup> в настоящее время нормализованы, однако нестандартные уплотнения изготовляют и на более высокие давления — до 8,0 Н/мм<sup>2</sup>.

### § 11.5. Аппараты с герметичным приводом

Конструкции сальников аппаратов высокого давления чрезвычайно сложны и не всегда обеспечивают необходимую герметичность, а потери мощности в сальнике иногда превышают расход энергии на перемешивание. Трудности, связанные с вводом вала в аппарат высокого давления через сальник, привели к созданию конструкций с герметизированным приводом [22].

Существует несколько способов осуществления бессальникового привода. Наибольшее распространение получил привод с экранированным двигателем (рис. 217). Ротор 1 электродвигателя крепят непосредственно на вал мешалки 5. Его отделяют от статора 3 защитной гильзой 4 и приводят в дви-

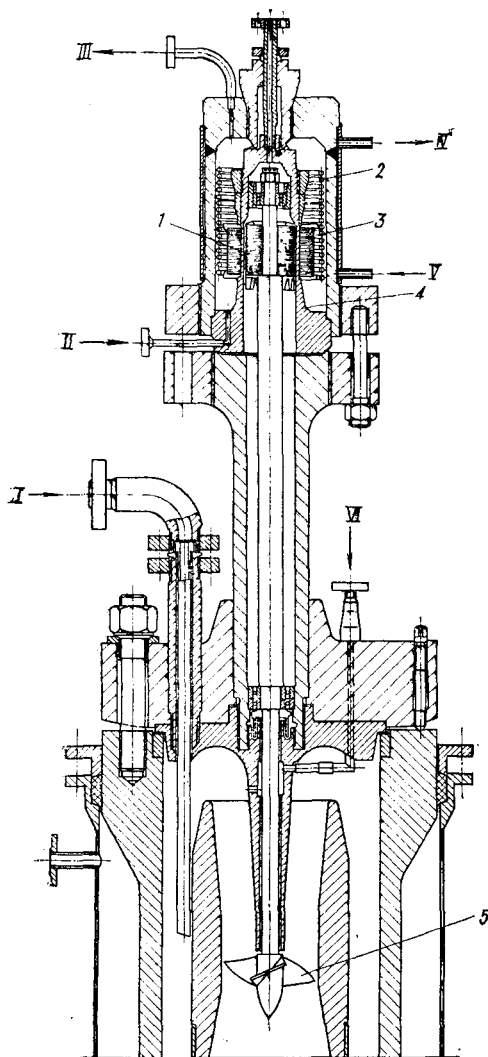


Рис. 217. Привод с экранированным электродвигателем:

I — вход продукта; II — подача смазки в двигатель; III — выход смазки; IV — V — выход и вход охлаждающей жидкости; VI — подача чистой жидкости для защиты подшипников

жение вращающимся магнитным полем статора. Пространство под защитной гильзой 4 связано с аппаратом, и на стенки гильзы действует то же давление, что и в аппарате. Толстые стенки защитной гильзы увеличивают магнитное сопротивление зазора между ротором и статором и снижают тем самым к. п. д. привода. Чтобы уменьшить толщину стенки, ротор делают малого диаметра, а плас-

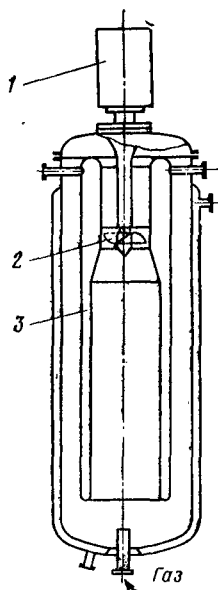


Рис. 218. Реактор с герметичным приводом и циркуляционной трубой

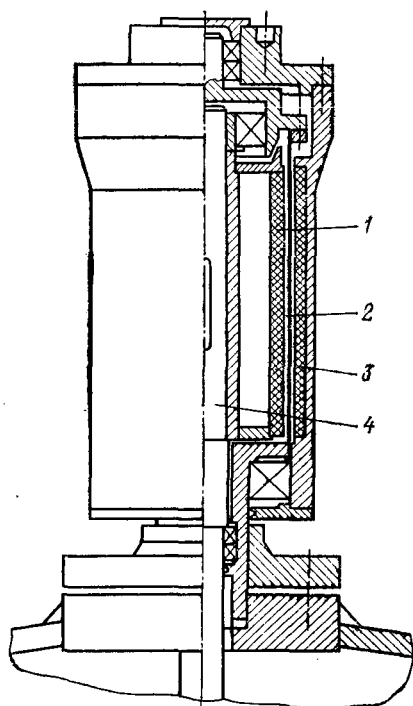


Рис. 219. Магнитная муфта

тины статора надевают с натягом на защитную гильзу. Мотор отделен от аппарата узкой горловиной, для того чтобы уменьшить теплопередачу от аппарата к мотору. Статор двигателя охлаждают с помощью водяной рубашки и змеевика 2.

Смазка подшипников вала и защита их от действия агрессивной среды при работе с корродирующими веществами являются сложной задачей. Одним из таких способов является подача в полость подшипников нейтрального компонента, создающего там противодействие. В случае отсутствия такого компонента возможны подача инертного газа, применение подшипников скольжения, стойких в данной среде, или закрытых подшипников с индивидуальной смазкой.

Аппараты с герметичным приводом имеют ряд конструктивных особенностей. Во-первых, это, как правило, аппараты высокого давления, представляющие собой колонну малого диаметра и большой высоты (рис. 218). Они имеют быстроходную мешалку ( $100 \div 150 \text{ с}^{-1}$ ), соосно связанную с ротором асинхронного двигателя. Из-за высокого числа оборотов и верхнего расположения подшипников большой вылет вала недопустим, поэтому мешалку 2 располагают в верхней части аппарата. Принята циркуляционная схема перемешивания. Пропеллерная мешалка расположена внутри направляющего аппарата, выполненного в виде длинной трубы 3. Мешалка 2, приводимая в движение приводом 1 создает значительные осевые потоки, благодаря которым жидкость проходит сначала внутри трубы, а затем в кольцевом пространстве между трубой и корпусом аппарата. Интенсивность перемешивания в этом случае очень велика. Данные аппараты применяют для гидрирования, алкилирования и других процессов, при высоком давлении в которых требуется интенсивное перемешивание компонентов.

Находят применение также герметичные приводы с магнитной муфтой (рис. 219). Привод имеет два ротора — наружный и внутренний, которые разделены неподвижной гильзой 2. Внутренний ротор связан с валом 4, а наружный — соединен с приводом. На роторах рядами установлены постоянные внутренние 1 и наружные 3 магниты. При вращении наружного ротора магнитное поле, образуемое его магнитами, перемещается и увлекает за собой магниты 1 внутреннего ротора. Привод применяют при небольших крутящих моментах на валу (не более  $300 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ) и невысоких давлениях, так как при повышенных давлениях возрастает толщина стенки разделительной гильзы и резко снижается к. п. д. привода.

**Пример 11.** Рассчитать на прочность четырехлопастную мешалку, состоящую из двух двухлопастных, насаженных на общий вал, если мощность на ее валу 7 кВт, число оборотов мешалки  $n=48 \text{ об/мин}$ , размах мешалки  $d_m=1600 \text{ мм}$ , ширина лопасти 160 мм. Материал мешалки — Ст3.

**Решение.**

Крутящий момент вала мешалки  $M_{кр}=97\,600 \text{ Н}/n=97\,600 \cdot 7/48=14\,200 \text{ кг} \cdot \text{см} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ . Предварительно принимаем диаметр вала  $d=85 \text{ мм}$ , диаметр вала ступицы  $d_0=160 \text{ мм}$  ( $r=80 \text{ мм}$ ). Радиус приложения равнодействующей

$$r_0 = \frac{3}{4} \frac{R^3 - r^4}{R^3 - r^3} = \frac{3}{4} \cdot \frac{800^3 - 80^3}{800^3 - 80^3} = 610 \text{ мм};$$

равнодействующая сил сопротивления  $P=M_{кр}/(r_0 z)=1,42 \cdot 10^6/(610 \cdot 4)=635 \text{ Н}$ .

Изгибающий момент у основания лопасти  $M_{изг}=P(r_0 - r)=635(610 - 80) = 334\,000 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ , необходимый момент сопротивления  $w=M_{изг}/[\sigma]=334\,000/160 = 2100 \text{ мм}^3$ .

Толщина лопасти  $s = \sqrt{6w/b} = \sqrt{6 \cdot 2100/160} = 8,8 \text{ мм}$ , принимаем  $s=10 \text{ мм}$ .

**Пример 12.** Проверить на критическое число оборотов вал открытой турбинной мешалки, если диаметр мешалки  $d_m=600 \text{ мм}$ , масса мешалки  $m=18,0 \text{ кг}$ , число оборотов  $n=180 \text{ об/мин}$ , диаметр вала  $d=80 \text{ мм}$ . Вал имеет две промежуточные опоры. Длина вала  $L=3,2 \text{ м}$ , вылет  $l_1=2,5 \text{ м}$ . Модуль упругости материала вала  $E=2 \cdot 10^{11} \text{ Н/мм}^2$ .

**Решение.**

Момент инерции сечения вала  $J=3,14d^4/64=0,05 \cdot 0,08^4=2,05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$ . Масса единицы длины вала  $m_b=39,5 \text{ кг/м}$ . Величина  $K=m/(m_b L)=18,0/(39,5 \cdot 3,2) =$

$=0,143$ . По графику на рис. 231 для значений  $K=0,143$  и  $\alpha=2,5/3,2=0,78$  определяем  $\alpha=1,9$ .

Критическая угловая скорость

$$\omega_0 = \frac{\alpha^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_b}} = \frac{1,9^2}{3,2^2} \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 2,05 \cdot 10^{-6}}{39,5} = 36 \text{ рад/с} = 344 \text{ об/мин},$$

допустимая  $\omega = 0,55\omega_0 = 0,55 \cdot 344 = 189,2$  об/мин, что больше фактического значения.

## ГЛАВА 12

### КОЛОННЫЕ РЕАКЦИОННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ЖИДКОФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ

Колонные реакционные аппараты применяют для процессов в фазах «жидкость — газ» и «жидкость — жидкость». Имеются случаи использования для химических процессов типовых тарельчатых и насадочных колонн, однако реакционные колонны имеют ряд конструктивных особенностей, связанных в первую очередь с необходимостью теплообмена и наличием катализатора.

В колонных аппаратах проводят реакции жидкофазного окисления органических продуктов, хлорирования, гидрирования и ряд других процессов органической и неорганической химии. Насадочные реакционные колонны часто имеют в качестве насадки катализатор.

На рис. 220 показан хлоратор непрерывного действия в производстве хлорбензола. Изнутри аппарат футерован диабазовой плиткой. В нижней части колонны крепят чугунную решетку 2, на которой уложена насадка 3 из смеси керамических и стальных колец. Железо в данном процессе служит катализатором. Жидкий бензол и газообразный хлор подают под решетку, и смесь движется снизу вверх прямооток. Тепло реакции отводится за счет частичного испарения реакционной массы. Хлорированная жидкость выходит через боковой штуцер в верхней части аппарата. Парогазовая смесь, содержащая хлористый водород, пары хлорбензола и другие примеси, удаляется через штуцер в крышке хлоратора. На выходе парогазовой смеси установлен каплеотбойник.

На рис. 221 показана колонна непрерывного гидрирования органических продуктов, работающая под высоким давлением  $32 \text{ Н/мм}^2$ . Корпус 5 колонны представляет собой вертикальный сосуд высокого давления в многослойном рулонированном исполнении. Внутри корпуса вставлена насадка 3 из титана, состоящая из четырех царг. В царги загружен катализатор 2 (платинированный уголь). Слой катализатора находится между двумя решетками, причем нижняя решетка поджата пружиной 1. Вставляется насадка через съемную верхнюю крышку 4. Жидкие исходные продукты и водород подают через нижний штуцер, продукты реакции выводят через верхний штуцер, таким образом, коррозионные реакционные продукты не соприкасаются со стенками колонны. Чтобы уравновесить давление

внутри корзины и в кольцевом пространстве между корзиной и корпусом, в него подают чистый водород.

Для жидкофазных процессов, идущих с большим тепловым эффектом, применяют колонны, имеющие развитую поверхность теплообмена, образованную спиральными змеевиками или вертикально расположенными трубными пучками. Так, например, на рис. 222 показана окислительная колонна, состоящая из шести царг, в каждой из которых установлено шесть concentрически расположенных охлаждающих змеевиков. Верхняя (расширенная) царга служит брызгоуловителем. Все части колонны и змеевики, соприкасающиеся со средой, изготовлены из кислотостойкой стали. В нижнюю часть колонны подается уксусный альдегид с раствором катализатора и кислород. Благодаря большому количеству змеевиков в колонне образуется своеобразная насадка, обеспечивающая хороший контакт между жидкостью и кислородом. Для разбавления парогазовой фазы в верхнюю часть колонны подается азот.

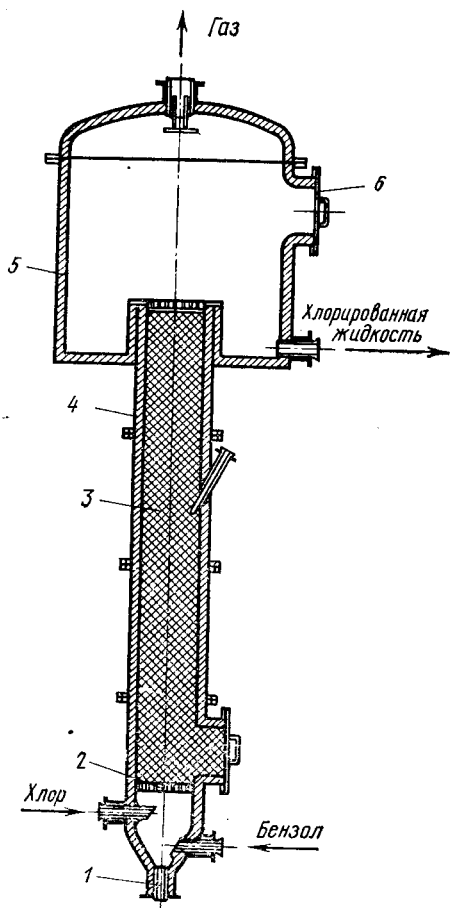


Рис. 220. Хлоратор непрерывного действия в производстве хлорбензола:

1 — штуцер для спуска осадка; 2 — чугунная решетка; 3 — насадка; 4 — гильза для термометра; 5 — нижняя часть хлоратора; 6 — расширенная часть хлоратора

кольцу подвешивают вытеснитель, назначение которого — не допустить прорыв жидкости и газа через пустую центральную часть колонны.

Для некоторых химических процессов, идущих в системе «жидкость—газ» с большим теплообменом, успешно применяют газлифтные реакторы (рис. 224). Аппарат напоминает собой кожухотрубный теплообменник, нижние концы труб которого опущены в слой жидкости на длину  $(4,5 \div 5)d_{\text{вн}}$ , где  $d_{\text{вн}}$  — внутренний диаметр тру-

На рис. 223 показано устройство царги колонны. Все входные и выходные патрубки змеевиков связаны с промежуточным кольцом, которое зажимается между двумя царгами и дает возможность вынуть кольцо вместе со всеми змеевиками. К промежуточному

кольцу подвешивают вытеснитель, назначение которого — не допустить прорыв жидкости и газа через пустую центральную часть колонны.

Рис. 221. Колонна непрерывного гидрирования

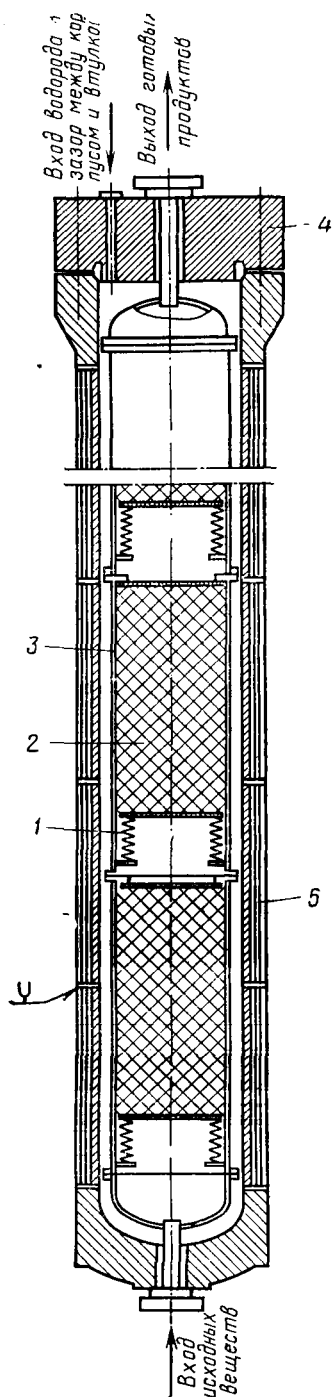
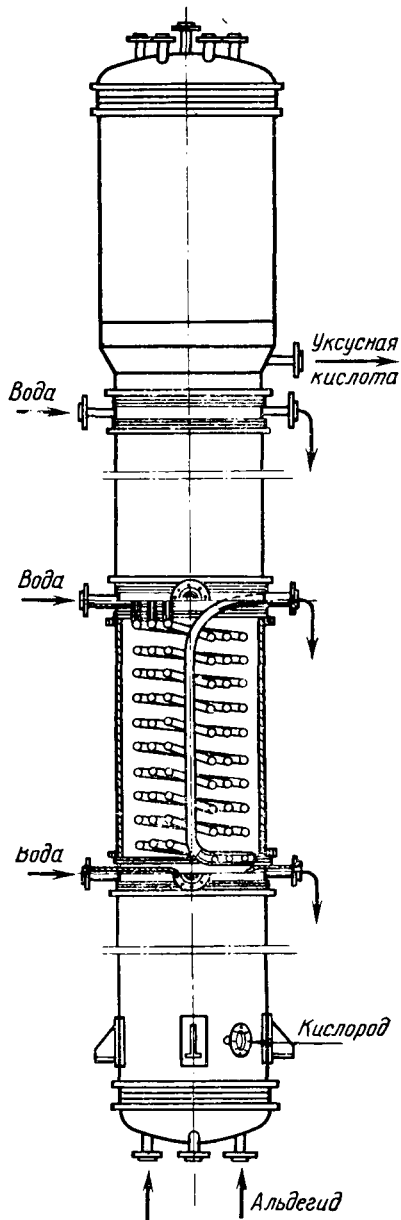


Рис. 222. Окислительная колонна



бы. Все трубы разделены на барботажные и циркуляционные. В стенках выступающих вниз концов барботажных труб строго на одном уровне просверлены отверстия. Жидкость входит в аппарат через нижний штуцер и выходит сверху. Когда газ вводится в ниж-

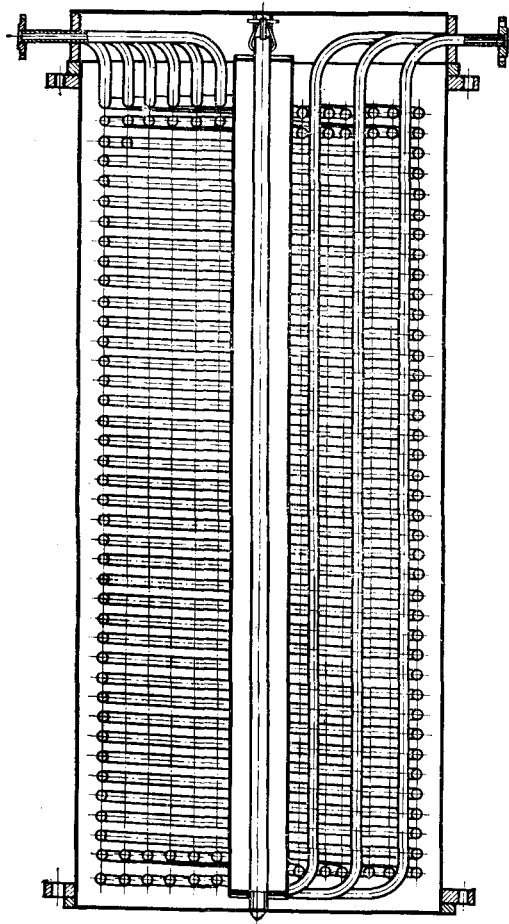


Рис. 223. Царга окислительной колонны

нюю камеру аппарата, под трубной решеткой образуется газовый слой, из которого газ через отверстия поступает в барботажные трубы. Газ входит в трубы с большой скоростью и увлекает с собой жидкость, в трубах образуется газожидкостная эмульсия, в которой очень интенсивно идут процессы тепло- и массообмена. Жидкость снова опускается в нижнюю часть по циркуляционным трубам. В межтрубное пространство аппарата в зависимости от теплового эффекта реакции подают хладагент или теплоноситель.

На рис. 225 показана колонна синтеза мочевины. Колонна имеет корпус 3 высокого давления, внутри которого находятся два стакана, вставленные один в другой. Стаканы изготовляют из кислотоустойчивой стали. Для удобства монтажа их собирают на фланцах

из двух частей. Жидкий аммиак вводится в колонну через штуцер в нижней крышке. Он поднимается по кольцевому пространству между стенкой корпуса 3 и наружным стаканом 4, а затем опускается между стенками наружного 4 и внутреннего 5 стаканов, что предохраняет стенки корпуса от корродирующего действия плава мочевины. Во внутренний стакан через трубу непосредственно в поток аммиака вводится углекислый газ, который барботирует через слой плава. Для лучшего смешения аммиака с углекислотой установлены пять перегородок с направляющими лопастями 6, при-

дающими потоку поочередно то правое, то левое вращение. Плав мочевины медленно поднимается внутри стакана и выводится из колонны через центральную трубу. Наружный стакан опирается на нижнюю крышку колонны. Для центровки стакана в корпусе колонны на него наплавлены бобышки. Уплотнение между стаканом и нижней крышкой колонны осуществляется за счет веса самого стакана. Внутренний стакан опирается четырьмя лапами на кольцо в верхней части колонны. Он должен быть установлен точно по центру, так как выводная труба, сваренная со стаканом, выходит через отверстие в крышке аппарата. Труба

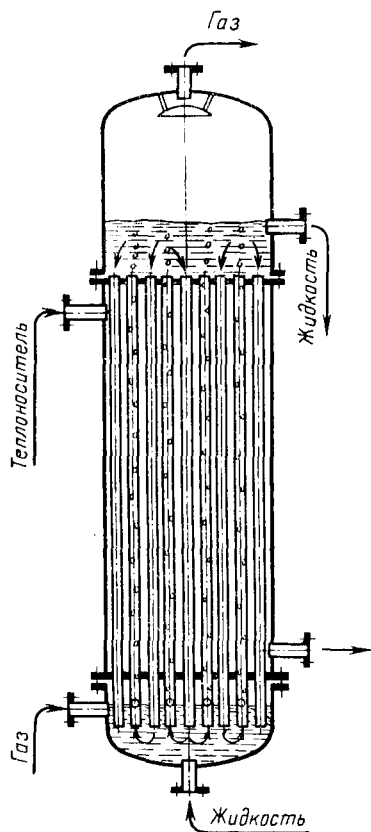


Рис. 224. Газлифтный реактор

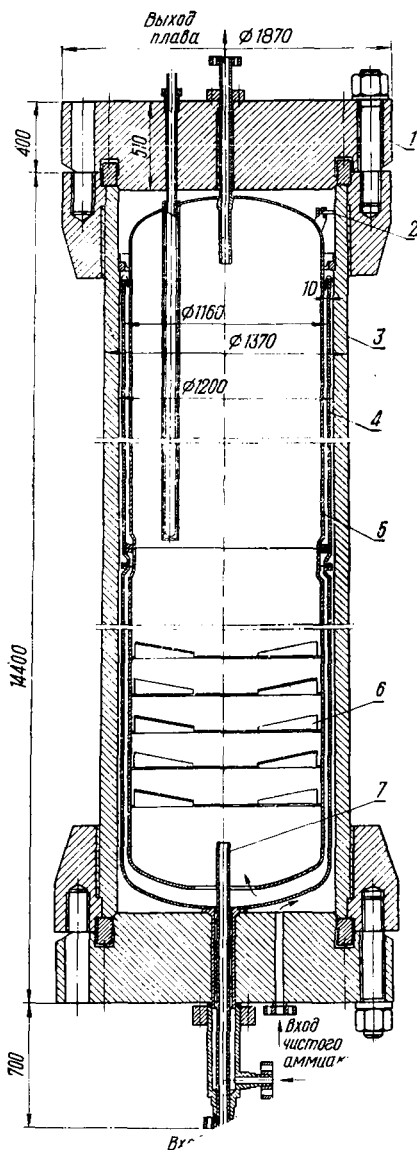


Рис. 225

центрируется с помощью четырех болтов, упирающихся в стенки колонны.

Уплотняют выводную трубу с помощью треугольной прокладки (обтюратора). Через нижний центральный штуцер в колонну вводится возвратный аммиак (если технологическая схема предусматривает возврат части аммиака в колонну), движущийся в кольцевом пространстве между трубой 7 для подачи углекислоты газа и трубой, соединенной с наружным стаканом. Через крышку 1 колонны вводится термопара. Чехол для термопары помещают в защитный кожух, введенный во внутренний стакан, что позволяет избежать установки сальника в крышке стакана (2 — центрирующие болты).

## ГЛАВА 13

### АППАРАТУРА ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ

Для химических процессов в твердой фазе применяют аппараты с псевдооживленным слоем барабанного и гребкового типа, которые подробно были описаны в гл. 7. В настоящей главе приведены не-

которые специфические типы реакционных аппаратов для процессов в твердой фазе [39]. Суперфосфатная камера — главный аппарат производства суперфосфата. В камеру из смесителя загружают полужидкую смесь измельченного фосфата и серной кислоты. В течение 1,5÷2 ч смесь затвердевает и превращается в ноздреватую рыхлую массу. При разгрузке массу измельчают суперфосфат из камеры отправляют на склад, где в течение некоторого времени «дозревает», т. е. процесс до конца.

фосфатных камер

ножам  
дв

суперфосфат из камеры отправляют на склад, где в течение некоторого времени «дозревает», т. е. процесс до конца.

работы различают камеры непрерывной. Примером камеры периодического действия является камера Бескова (рис. 226, а), которую используют в производстве суперфосфата. Внутри камеры установлена фреза. По окончании работы камеры открывают и платформа срезает весь слой за слоем суперфосфат вырезательной машине,

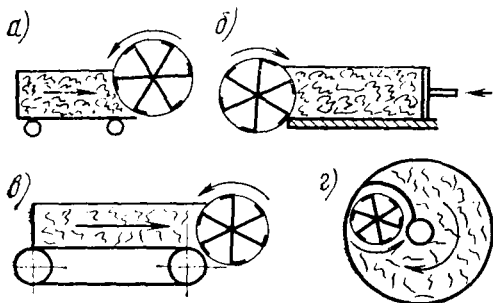


Рис. 226. Т-

226  
Колонна  
внутренняя  
стержень  
литература  
опыт  
2000  
2000  
2000

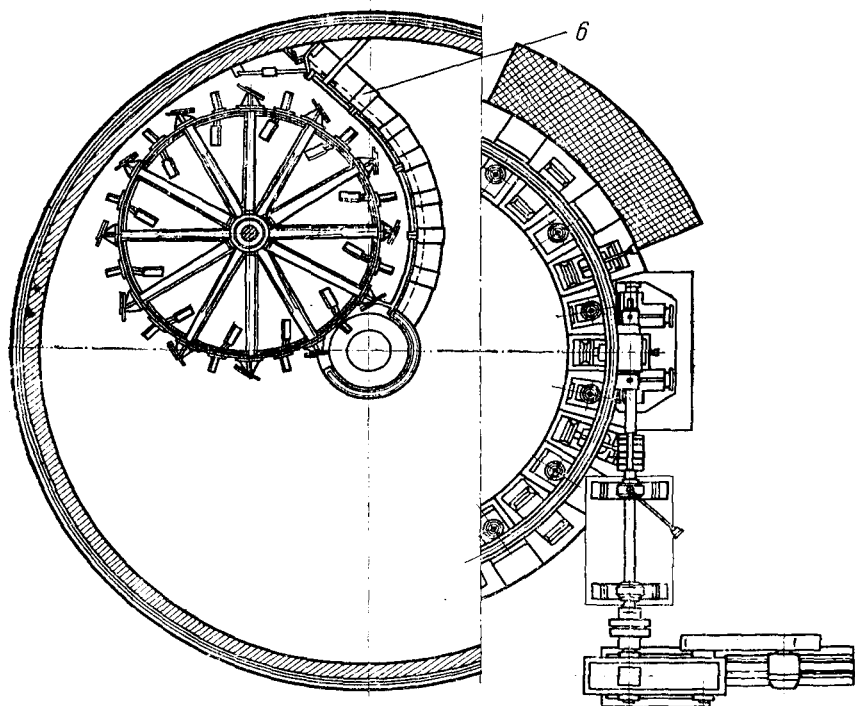
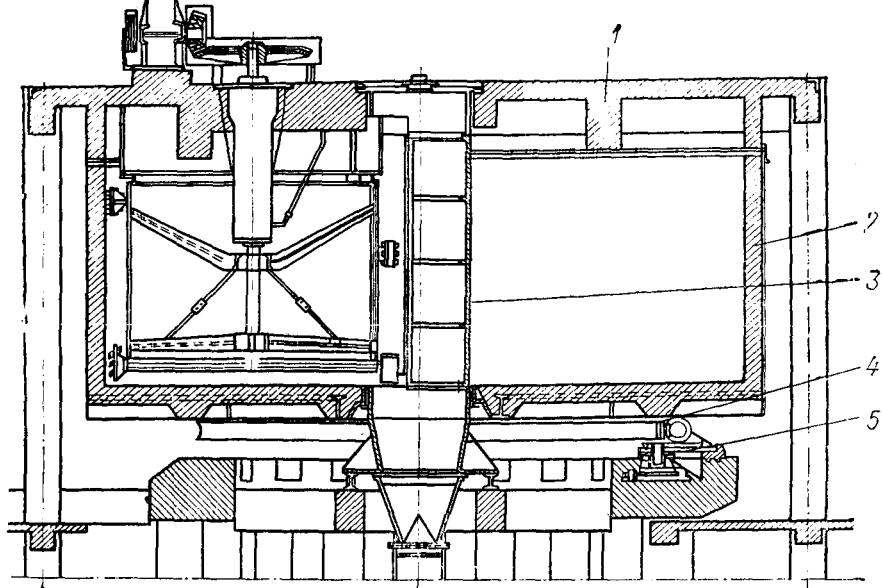


Рис. 227. Суперфосфатная камера непрерывного действия

измельчающей материал. Периодические камеры имеют ряд недостатков: низкую производительность, тяжелые условия труда, неравномерный состав суперфосфата.

В настоящее время строят только камеры непрерывного действия, из которых наиболее распространены туннельные и вращающиеся камеры. В туннельной камере (рис. 296, в) пульпа загружается с одного конца на пластинчатый транспортер и медленно движется по туннелю. Готовый суперфосфат загружается с противоположного конца. На разгрузке установлены режущие ножи. Вращающуюся камеру (рис. 226, г) широко применяют в СССР, поэтому конструкцию ее рассматривают подробно. Камера (рис. 227) состоит из вращающейся цилиндрической чаши 2 с неподвижной железобетонной крышкой 1, опирающейся на железобетонные стойки. На днище чаши закреплен опорный бандаж 4, который лежит на опорных роликах 5. Камера медленно вращается на роликах. Внутри камеры помещена карусель, подвешенная к неподвижной крышке. Она служит для вырезки суперфосфата. По вертикальной оси камеры установлена неподвижная чугунная труба 3, верхний конец ее закрепляется в железобетонной крышке и закрывается заглушкой. Внизу труба проходит через вращающееся днище камеры и опирается на металлическую раму. Место прохода трубы через дно камеры уплотняется сальником. В трубе имеется вырез, через который ссыпается готовый суперфосфат. Внутри камеры подвешена неподвижная чугунная перегородка 6, которая крепится к крышке камеры и к центральной трубе. Перегородка делит камеру на две части, по одну ее сторону загружается пульпа через отверстие в крышке, по другую — расположена вращающаяся карусель с ножами. Край перегородки, обращенный к наружной стенке камеры, оканчивается уплотнением из резинового листа. Загружаемая в камеру суперфосфатная пульпа медленно перемещается по направлению к карусели, к моменту приближения пульпа окончательно схватывается. На карусели закреплены ножи и скребки, которыми суперфосфат срезается и сваливается через окна во внутреннюю трубу. Готовый суперфосфат удаляется с помощью транспортера или шнека. Чаша камеры сделана из железобетона и имеет снаружи стальной кожух. Слой железобетона изнутри футеруется кислотоупорной замазкой. Бандаж, который служит опорой камеры, представляет собой кольцо, согнутое из двутавровой балки. К бандажу крепится червячное колесо, состоящее из шести отдельных секций. Бандаж опирается на 16 опорных роликов, расположенных по кругу. Для того чтобы предотвратить сползание камеры с роликов, имеется 16 упорных роликов с вертикальными осями. Стойки роликов крепятся на круглом бетонном постаменте. Ролики делают коническими, а под бандаж подкладывают опорное кольцо, которое имеет уклон к центру камеры. Привод камеры осуществляется через клиноременную передачу, редуктор и червячную передачу. Составное червячное колесо, закрепленное на бандаже камеры, выполняют чугуном, червяк изготавливают из стали. Клиноременный шкив на редукторе делают сменным. Меняя диаметр шкива, изменяют

время полного оборота, а вместе с тем и время пребывания пульпы в камере.

Карусель (рис. 228) представляет собой вертикальный цилиндрический барабан 7, закрепленный на валу 6. На цилиндрической поверхности барабана по винтовой линии расположены ножи 8, ко-

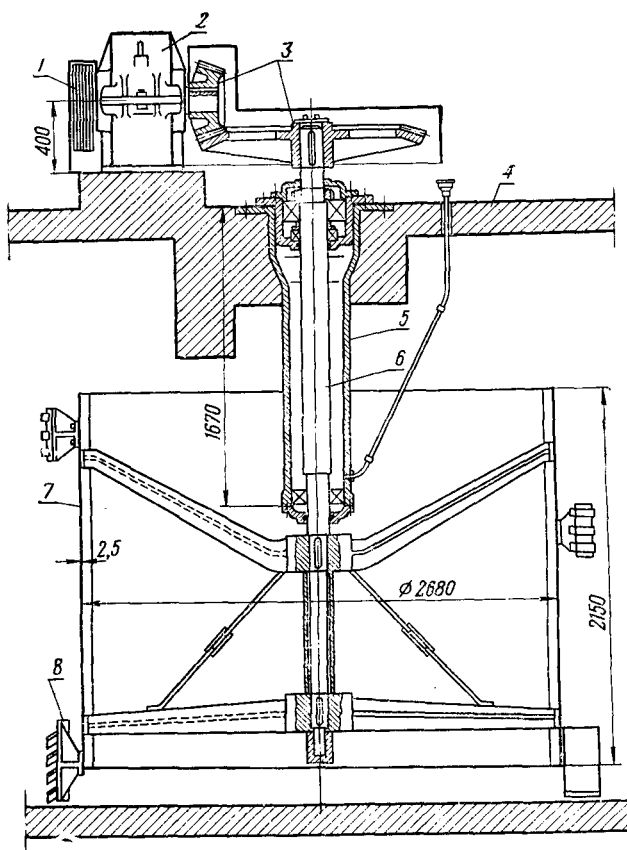


Рис. 228. Карусель суперфосфатной камеры

торыми суперфосфат срезается и сваливается в окно центральной трубы. На нижней части карусели закреплены скребки, подгребающие просыпавшийся суперфосфат с дна камеры и направляющие его в центральную трубу. Привод карусели осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу 1, редуктор 2 и пару конических шестерен 3. Подшипники вала карусели установлены в чугунной втулке 5, укрепленной в крышке камеры 4. Ножи крепят на болтах, что позволяет менять их по мере износа. Привод карусели и привод камеры связаны системой блокировки, которая останавливает вращение камеры в случае остановки карусели.

Для получения минеральных удобрений в гранулированном виде применяют аппараты с псевдооживленным слоем или грануляционные башни, представляющие собой железобетонные сооруже-

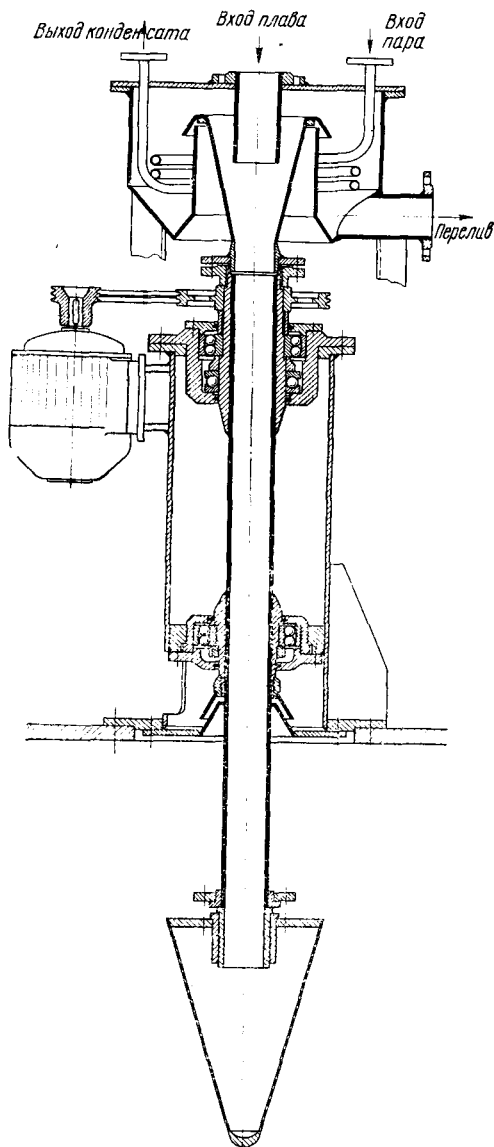


Рис. 229. Разбрызгиватель плава

ния высотой  $35 \div 40$  м и диаметром  $12 \div 16$  м. Внутри башня футерована кислотоупорным кирпичом. Коническое днище ее делают из бетона или углеродистой стали. Оно изготовлено из трех-четырех отдельных усеченных конусов, между которыми имеются щели для подсоса воздуха и чистки днища. Горячий плав аммиачной селитры разбрызгивается с помощью гранулятора, установленного в центре под крышкой башни. Струйки плава превращаются в капли диаметром  $1 \div 2$  мм, которые во время падения охлаждаются встречным воздухом и застывают в зерна (гранулы). Зерна разгружаются из башни через нижнее отверстие. На крышке башни установлены осевые вытяжные вентиляторы. Башни обычно строят группами (по две или три), но связывают в одно сооружение.

Разбрызгиватель (гранулятор) состоит из конической дырчатой корзины, закрепленной на полом валу. Плав заливается через полый вал. Избыток плава сливается через воронку, обогреваемую паровым змеевиком (рис. 229). Корзина вра-

щается с частотой  $45 \div 50$  с<sup>-1</sup>. Недостаток этого гранулятора — неравномерное распределение селитры по сечению башни, кроме того, отверстия в корзине быстро забиваются, ее надо вынимать и чистить, что приводит к простоям в работе.

## ТРУБОПРОВОДЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### ГЛАВА 14

#### ТРУБЫ И ДЕТАЛИ ТРУБОПРОВОДОВ

##### § 14.1. Трубы

К частям трубопроводных систем относятся трубы и их фасонные части, детали для соединения и крепления трубопроводов, компенсаторы температурных удлинений, трубопроводная арматура. Трубы — основная часть трубопроводов. Их изготавливают из стали, чугуна, цветных металлов, стекла, керамики, фарфора, пластмасс, т. е. практически из всех конструкционных материалов химического машиностроения. Наиболее широко применяют стальные трубы [43, 44, 46].

**Стальные трубы.** Их делают сварными и бесшовными. Сварные трубы — водогазопроводные (газовые) и электросварные — имеют продольный или спиральный сварной шов, поэтому они менее надежны в работе. Водогазопроводные трубы применяют для воды, сжатого воздуха, газа, пара низкого давления и других нейтральных и невзрывоопасных сред при температуре от  $-16$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . Их выпускают для давлений до  $1 \text{ Н/мм}^2$  (обыкновенные) и до  $1,6 \text{ Н/мм}^2$  (усиленные). Электросварные трубы имеют более широкие пределы применения.

Бесшовные трубы не имеют сварного шва, поэтому более надежны. Их применяют для самых различных целей в весьма широком интервале температур и давлений. Их используют для транспортировки разнообразных продуктов, в том числе ядовитых, взрывоопасных и корродирующих веществ при температуре от  $-180$  до  $+800^{\circ}\text{C}$  и давлении до  $200 \text{ Н/мм}^2$ . Эти трубы широко применяют для изготовления частей аппаратуры — штуцеров, трубных пучков теплообменников и др. Бесшовные трубы изготавливают из сталей различных марок. Наряду с трубами массового назначения, выполняемыми из стали марок 10 и 20, в случае необходимости применяют трубы из легированных сталей 12МХ, 15ХМ, Х5М или из высоколегированных кислотостойких и жаропрочных сталей 12Х18Н10Т; 10Х17Н13М2Т и др. При выборе материала труб руководствуются в основном соображениями, изложенными в гл. 1. Базовый размер у бесшовных труб — наружный диаметр, поэтому внутренний изменяется в зависимости от толщины стенки. ГОСТами предусматривается значительное количество типоразмеров труб, например в ГОСТ 8734—58 предусмотрено более 80 диаметров труб, однако на практике применяют небольшое число типоразмеров, выбранных из ГОСТов.

**Чугунные трубы.** Чугунные канализационные трубы не рассчитаны для работы под давлением, они предназначены для передачи жидкости самотеком. Чугунные водопроводные трубы рассчитаны на давление до  $1,0 \text{ Н/мм}^2$  (обыкновенные) и  $1,6 \text{ Н/мм}^2$  (усиленные). Их выпускают диаметрами от 50 до 1000 мм. Чугунные трубы применяют главным образом для укладки в землю. Трубы из кремнистых чугунов — ферросилида и антихлора — изготовляют диаметром от 32 до 300 мм. Они предназначаются для транспортировки кислот при давлении до  $0,25 \text{ Н/мм}^2$ .

**Медные и латунные трубы.** Их выпускают диаметром до 360 мм. Медные применяют в технике глубокого холода, в промышленности органического синтеза и пищевой промышленности. При температуре свыше  $250^\circ\text{C}$  эти трубы для работы под давлением применять не рекомендуется. Латунные находят в химической промышленности ограниченное применение.

**Алюминиевые трубы.** Их широко применяют для транспортировки азотной, уксусной кислоты и некоторых других агрессивных продуктов, для работы под давлением при температуре до  $160^\circ\text{C}$ .

**Свинцовые трубы.** Несколько лет назад они были почти единственным средством для транспортирования слабых растворов серной кислоты и других кислых сред. В настоящее время они почти полностью заменены пластмассовыми трубопроводами. Все большее распространение находят **титановые трубы** (диаметром до 150 мм).

**Неметаллические трубы.** Во многих случаях при транспортировке агрессивных веществ их с успехом применяют вместо труб из цветных металлов и кислотостойких сталей. Керамиковые канализационные (безнапорные) трубы изготовляют внутренним диаметром от 125 до 600 мм. Их применяют для уличных сетей канализации, а также для внутрицеховой канализации, предназначенной для удаления агрессивных жидкостей. Керамиковые кислотопорные трубы рассчитаны на внутреннее давление до  $0,25 \text{ Н/мм}^2$ . Они предназначены для передачи корродирующих жидкостей при температуре до  $130^\circ\text{C}$ . Их выпускают диаметром от 25 до 300 мм с буртами под свободные фланцы или раструбы.

**Стекланные трубы.** Их широко применяют в пищевой и фармацевтической промышленности, в настоящее время — в отдельных отраслях химической промышленности. Их устанавливают там, где требуется особая чистота продуктов и оптический контроль за перемещаемыми веществами. Напорные стекланные трубы изготовляют двух классов: Ст8 и Ст4, в зависимости от давления, на которое они рассчитаны. Трубы класса Ст8 должны выдерживать внутреннее рабочее давление  $0,8 \text{ Н/мм}^2$ , класса Ст4 —  $0,4 \text{ Н/мм}^2$ . Толстостенные стекланные трубы имеют внутренний диаметр от 13 до 170 мм. Стекланные трубопроводы допускают резкий температурный перепад  $40^\circ\text{C}$  при нагревании и  $30^\circ\text{C}$  при охлаждении.

**Фарфоровые трубы.** В химической промышленности их применяют мало и используют лишь в тех случаях, когда требуется

особая чистота продуктов. Из пластмассовых труб наиболее распространены трубы из винипласта, фаолита, полиэтилена.

**Винипластовые трубы.** Их изготавливают с внутренним диаметром до 150 мм. Температурные пределы их применения до 40° С. Эти трубы при незначительном нагреве хорошо гнутся и отбортовываются. Винипластовый трубопровод применяют для транспортирования различных кислот и щелочей, за исключением окислителей и концентрированной серной кислоты, вакуумных линий и воздушников в условиях агрессивной среды.

**Трубы из полиэтилена.** По своим свойствам и применению они близки к винипластовым. Полиэтилен по сравнению с винипластом обладает более высокой ударной прочностью.

**Трубы из фаолита.** Их выпускают диаметром до 200 мм. Они рассчитаны на максимальное давление до 1 Н/мм<sup>2</sup> и рабочую температуру до 100÷110° С. Эти трубы применяют для транспортирования продуктов как внутри цеха, так и для межцеховых коммуникаций.

**Трубы из фторопласта.** Они находят ограниченное применение из-за трудности его обработки.

Весьма перспективны стальные трубы с антикоррозионным покрытием, так как при этом механическая прочность стальной трубы сочетается с антикоррозионными свойствами покрытия.

**Гуммированные трубы.** Они хорошо освоены. Их применяют при температурах до 60÷65° С. Они допускают вакуум не более 0,03 Н/мм<sup>2</sup>. Допустимая величина внутреннего давления определяется прочностью стальной трубы. Гуммированный трубопровод собирают из звеньев длиной не более 4 м. Диаметр труб под гуммирование должен быть не менее 40 мм. Наряду с гуммировкой трубы защищают пленками из пластмасс и антикоррозионной краской. Находят применение трубы, плакированные изнутри свинцом или медью. В настоящее время осваиваются трубы, эмалированные изнутри.

**Расчет труб на прочность.** Толщина стенки тонкостенных труб

$$s = p d_{\text{в}} / (2,3 [\sigma] \varphi + p) + c, \quad (148)$$

где  $p$  — рабочее давление, Н/мм<sup>2</sup> (кг/см<sup>2</sup>);  $d_{\text{в}}$  — внешний диаметр трубы, мм (см);  $[\sigma]$  — допустимое напряжение материала трубы при рабочей температуре, Н/мм<sup>2</sup>;  $c$  — прибавка на коррозию, мм;  $\varphi$  — коэффициент прочности шва (для бесшовных труб  $\varphi = 1$ ; для сварных  $\varphi = 0,8$ ).

Прибавка  $c = 0,15 \div 0,20$  мм, но не менее 0,5 мм. Для трубопроводов с коррозионной средой эта прибавка увеличивается в зависимости от скорости коррозии. Допускаемое напряжение  $[\sigma] = \sigma_{nr} / n$ , где  $\sigma_{nr}$  — предел прочности при рабочей температуре;  $n = 3,75 \div 4$  — запас прочности.

Толщину стенки трубы, определенную расчетом, округляют по сортаменту до ближайшего большего размера. Трубы, испытывающие наружное давление, рассчитывают как длинные цилиндрические оболочки.

При определении расстояния между опорами трубопровод, лежащий на свободных опорах, рассматривают как неразрезную балку. Максимальный изгибающий момент

$$M = ql^2/12, \quad (149)$$

где  $q$  — удельная нагрузка на единицу длины трубопровода, учитывающая вес самого трубопровода, транспортируемой жидкости и термоизоляции, Н/мм;  $l$  — расстояние между опорами, мм.

Подставляя в уравнение прочности при изгибе значение изгибающего момента, после преобразований определяем максимальное расстояние между опорами:

$$l = \sqrt{12[\sigma_{\text{изг}}] \omega / q}, \quad (150)$$

где  $\omega$  — момент сопротивления поперечного сечения трубы, мм<sup>3</sup>;  $[\sigma]_{\text{изг}}$  — допускаемое напряжение на изгиб от собственного веса.

Допускаемое напряжение для стальных труб следует принимать не более 50 Н/мм<sup>2</sup>.

## **§ 14.2. Соединения трубопроводов и фасонные части к ним**

Соединения трубопроводов подразделяют на разъемные и неразъемные. К неразъемным относятся соединения на сварке, пайке, склейке (для некоторых видов пластмассовых трубопроводов), к разъемным — фланцевые, резьбовые, раструбные и специальные виды соединений.

Для некоторых трубопроводов (например, для стальных) возможны оба вида соединений. При решении вопроса, какой из них выбрать, руководствуются следующими соображениями. Цельносварной трубопровод предпочтительнее, так как отсутствие фланцевых и резьбовых соединений повышает его герметичность. Но такой трубопровод не следует применять, если передаваемый продукт вызывает коррозию сварных швов, а также при транспортировке загрязненных и застывающих жидкостей, когда требуется частая разборка трубопровода для очистки и промывки и в случае, когда трубопровод расположен во взрывоопасном цехе, где не допускается производство сварочных работ.

Самое распространенное разъемное соединение — фланцевое. Соединяют трубы с помощью фланцев для трубопроводов (а не для аппаратуры), размеры соединения выбирают в соответствии с условным давлением. В зависимости от материала труб и параметров среды применяют фланцевые соединения самых различных типов. Наряду с приварными фланцами применяют свободные (для трубопроводов из цветных металлов, винипласта, полиэтилена), а в линиях высокого давления — съемные на резьбе.

Для соединения некоторых неметаллических труб используют специальные типы фланцевых соединений, например для стеклян-

кольцами или специальные накидные муфты.

**Раструбные соединения.** Их выполняют для чугунных, керамиковых, стеклянных и фаолитовых труб. Преимущество раструбного соединения — сохранение герметичности при значительном перекасе. Недостатки — трудность разъема и недостаточная надежность при повышенном давлении. Раструб законопачивают каким-либо волокнистым материалом, например пеньковой или льняной прядью, и замазывают мастикой. Раструбы фаолитовых труб заполняют замазкой из неотвержденного фаолита с последующей полимеризацией.

**Резьбовые соединения.** Их применяют для газовых труб при невысоких давлениях в безопасных средах (вода, воздух, пар низкого давления). Газовые трубы соединяют на резьбе с помощью резьбовых муфт. Трубная резьба отличается от нормальной крепежной меньшим шагом и меньшей глубиной нарезки, поэтому она незначительно ослабляет стенку трубы. Резьбовые соединения для гидравлических систем высокого давления выполняют с конической резьбой, которая обеспечивает высокую герметичность соединения.

**Легкоразборные соединения** применяют для присоединения шлангов и временных линий. Одно из них — соединительная гайка, состоящая из двух патрубков и накидной гайки, которую надевают на выступ нижнего патрубка. Она служит для зажима мягкой прокладки между патрубками.

**Стальные трубы** сваривают газовой и электродуговой сваркой. Сварка с предварительным утолщением концов труб дает возможность получить усиленный сварной шов, не уступающий по прочности основному металлу трубы. В том случае, когда хотят избежать попадания металла внутрь трубы и сохранить гладкое сечение трубопровода, применяют сварку с центрирующими подкладными кольцами. С помощью сварки соединяют также трубы из цветных металлов — меди, алюминия, титана. Значительно реже для соединения медных, алюминиевых или свинцовых труб применяют пайку.

**Фасонные части трубопроводов.** Фасонные части служат для перехода с одного диаметра на другой, поворота трубопровода и разветвления потока. Из материалов, допускающих сварку и пластическую деформацию (сталь, цветные металлы, винипласт и др.), фасонные детали могут быть изготовлены непосредственно на монтажной площадке. Для трубопроводов из чугуна, керамики и стекла такие детали на монтажной площадке изготовить нельзя, поэтому при прокладке трубопроводов необходимо учитывать сортамент и размеры фасонных частей, поставляемых промышленностью. В настоящее время стремятся полностью исключить изготовление фасонных частей на монтажной площадке, т. е. фасонные части для стальных трубопроводов производят на специализированных заводах. На рис. 230 показаны основные фасонные детали.

Отводы изготовляют путем гнутья труб, штамповки,ковки, сварки из отдельных элементов или отливки. Необходимо иметь в виду, что минимальный радиусгиба стальных труб не менее  $2,5 d$ , где  $d$  — наружный диаметр трубопровода. Для разветвления трубопроводов применяют тройники или крестовины. Для стальных трубопроводов данные детали изготовляют сваркой, а при высоких давлениях их делают цельноковаными.

**Компенсаторы температурных удлинений.** Для компенсации температурных удлинений трубопроводов применяют компенсаторы, гнутые из труб, а также линзовые и сальниковые. Гнутые компенсаторы устанавливают на стальных и алюминиевых линиях и других трубопроводах из пластичных материалов. Эти компенсаторы могут быть П-образными и лирообразными, из гладких и складчатых труб. Складки на трубе получают, нагревая при изгибе

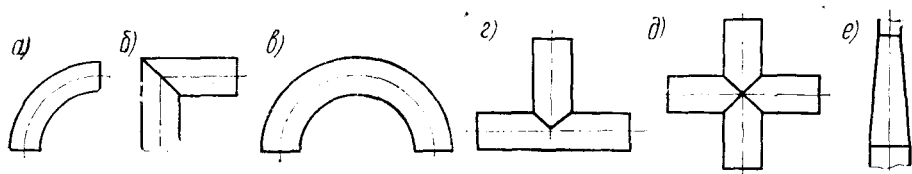


Рис. 230. Фасонные части трубопроводов:  
а — отвод; б — колесо; в — двойник; г — тройник; д — крестовина; е — переход

отдельные поперечные полосы и выгибая их. Складчатые компенсаторы более гибки и обладают большей компенсирующей способностью. Компенсаторы изготовляют из цельнотянутых труб, сварные — допускают только для неответственных линий малого диаметра и с небольшим давлением. Гнутые компенсаторы устанавливают в горизонтальной плоскости. Если же это не удастся, то в нижней части компенсатора делают дренажный патрубок. Компенсаторы, гнутые из труб, имеют следующие положительные качества: простоту изготовления, значительную компенсирующую способность (обычно 400–500 мм) и незначительные осевые усилия. Недостатками их являются громоздкость и сравнительно большое гидравлическое сопротивление.

Линзовые компенсаторы (рис. 231) делают из штампованных полуолн. Обычно компенсирующей способности одной линзы бывает недостаточно и устанавливают несколько линз, но не более восьми—десяти. Линзовые компенсаторы снабжают ограничителями сжатия, а при передаче жидкостей или конденсирующихся паров устраивают спускные краны.

Рассчитывают линзовые компенсаторы тем же методом, что и компенсаторы теплообменников. В отличие от последних линзовые компенсаторы трубопроводов имеют большую высоту волны, так как они должны компенсировать значительные удлинения.

Для стеклянных и фаолитовых трубопроводов применяют гофрированные компенсаторы из резины или фторопласта.

Компенсация тепловых удлинения в сальниковом компенсаторе осуществляется не за счет упругой деформации, а путем перемещения конца трубы в сальнике. Эти компенсаторы применяют для хрупких материалов, таких, как ферросилид, фарфор, стекло, из которых невозможно изготовить компенсатор другой конструкции. Чтобы предотвратить вырывание трубы из сальника, на конце ее делают зуб и заводят в специальный паз компенсатора. Преимущества сальниковых компенсаторов — значительная компенсирующая способность, ограниченная только длиной компенсатора, и компактность. Недостатки — необходимость периодически менять сальник во избежание пропуска среды, наличие осевого давления на трубо-

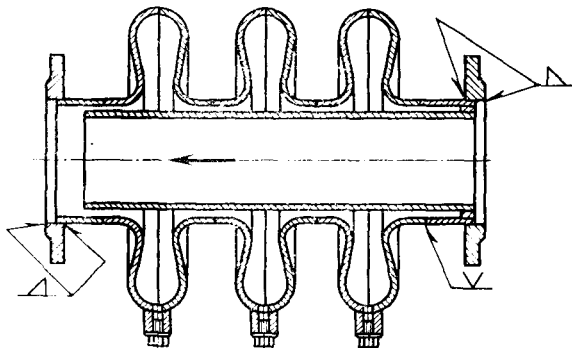


Рис. 231. Линзовый компенсатор

провод, достигающего большой величины, кроме того, сальники надежно работают лишь при тщательной центровке.

При транспортировке застывающих жидкостей применяют обогреваемые трубопроводы. Обогревают с помощью «спутника» — приварной трубки, по которой подается пар или какой-либо другой теплоноситель, а если температура застывания продукта высокая, применяют трубопровод с рубашкой.

## ГЛАВА 15

### ТРУБОПРОВОДНАЯ АРМАТУРА

#### § 15.1. Конструирование арматуры

*Арматурой* называют устройства, предназначенные для управления потоками жидкостей и газов, движущихся по трубопроводам [45]. В зависимости от назначения различают: арматуру запорную, предназначенную для полного перекрытия потока, и регулирующую, предназначенную для регулирования расхода или давления передаваемой среды; клапаны предохранительные и перепускные, служащие для выпуска избытка среды при повышении давления, и обратные, назначение которых — не допускать движение среды в об-

ратном направлении; специальную арматуру; указатели уровня, конденсатоотводчики, пробно-спускные краны и др.

Кроме того, трубопроводную арматуру классифицируют по передаваемой среде или конструкционным материалам.

В зависимости от способов присоединения к трубопроводу различают арматуру фланцевую, резьбовую и с концами под сварку. По способу приведения в действие — приводную с ручным или механическим приводом и самодействующую, приводимую в действие самой перемещаемой средой.

Основные параметры арматуры — условный диаметр прохода  $D_y$ ; рабочее и условное давление  $p_y$ . Из линейных размеров наиболее важна строительная длина, равная длине отрезка трубы, который она замещает. Арматуру устанавливают на трубопроводах, не-

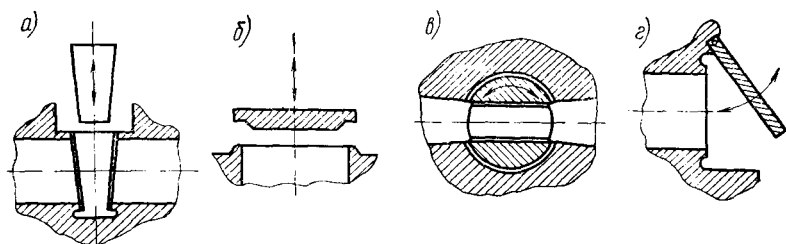


Рис. 232. Схема уплотняющих устройств запорной трубопроводной арматуры:

а — в задвижке; б — в вентиле; в — в пробковом кране; г — в поворотном клапане

посредственно на аппаратах, а в некоторых случаях она является неотъемлемой составной частью аппарата.

Наряду с трубопроводной арматурой массового назначения в химической промышленности применяют многие виды арматуры, предназначенные для весьма специфических целей: для работы в условиях сильной коррозии с загрязненными средами, с застывающими жидкостями и др.

**Запорная арматура.** Она наиболее широко применяется. В зависимости от конструкции и формы запорного устройства различают вентили, краны и задвижки.

**Вентили.** Это наиболее распространенная арматура. Ее применяют для самых различных сред в широком диапазоне давлений и температур. Проход в вентиле перекрывают с помощью клапана, совершающего поступательное движение (рис. 232). У вентилей сравнительно небольшой ход клапана, необходимый для полного его открытия (обычно достаточно поднять клапан на  $1/4$  диаметра отверстия в клапане). Недостаток вентилей — значительное гидравлическое сопротивление. Их не следует применять при работе с загрязненными средами.

В зависимости от конструкции и направления движения среды различают вентили прямые (проходные), угловые и косые (прямоточные). На рис. 233 показан наиболее распространенный прямой

вентиль. Он состоит из литого корпуса 7 и крышки 4, через которую проходит шпindelь 3, уплотненный в крышке с помощью сальника 1. Осевое перемещение шпинделя осуществляется за счет его вращения в ходовой гайке 2. Многочисленные типы вентилей весьма разнообразны по конструкции, однако все они имеют те же основные детали, что и вентиль, изображенный на рис. 233. Угловые вентили (рис. 234) имеют меньшее гидравлическое сопротивление, но они могут быть установлены только на поворотных участках

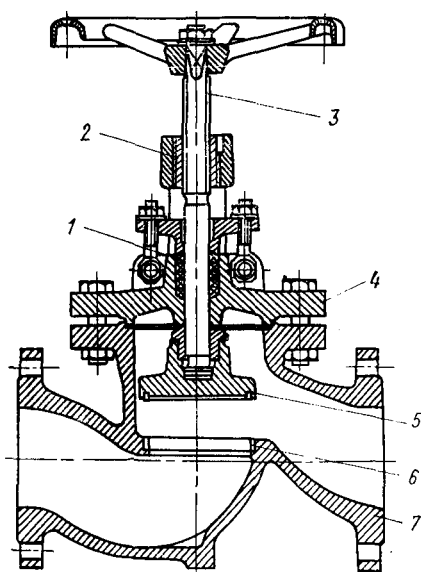


Рис. 233. Вентиль с прямым шпинделем

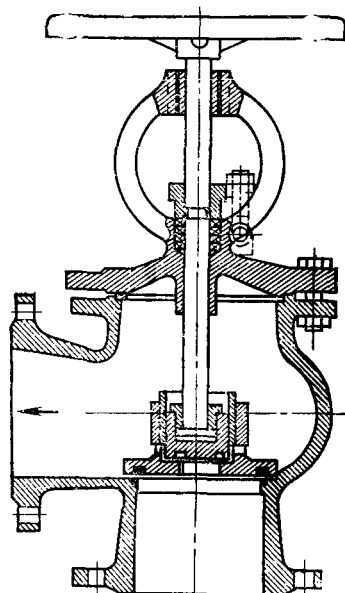


Рис. 234. Угловой вентиль

трубопровода. Косые (прямоточные) вентили (рис. 235) применяют в тех случаях, когда хотят снизить гидравлическое сопротивление. Они имеют шпindelь, расположенный наклонно под углом  $45^\circ$  к основной оси. Корпуса вентилей высокого давления изготовляют из цельной поковки, сальниковую набивку шпинделя у них делают высокой, чтобы обеспечить хорошее уплотнение. Резьбу шпинделя, как правило, выносят из корпуса вентилья, чтобы предохранить ее от действия корродирующих продуктов и высоких температур, однако в неответственных случаях, особенно в вентильях малого диаметра, в целях уменьшения размера ее помещают внутри корпуса.

В том случае, когда соединение пространства трубопровода с атмосферой недопустимо, применяют бессальниковые вентили, например, сильфонные, у которых клапан соединен с крышкой с помощью гибкого сильфона, диафрагмовые (рис. 236), защищенные изнутри антикоррозионным покрытием. Уплотняющим органом

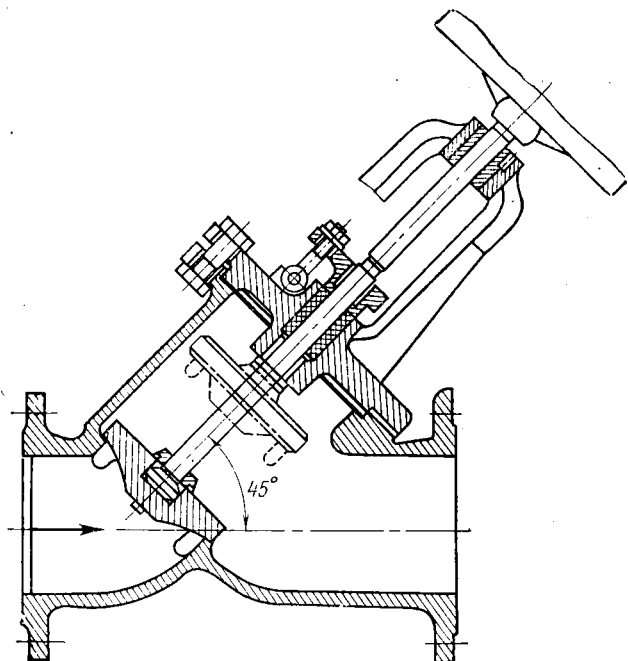


Рис. 235. Вентиль косой (прямоточный)

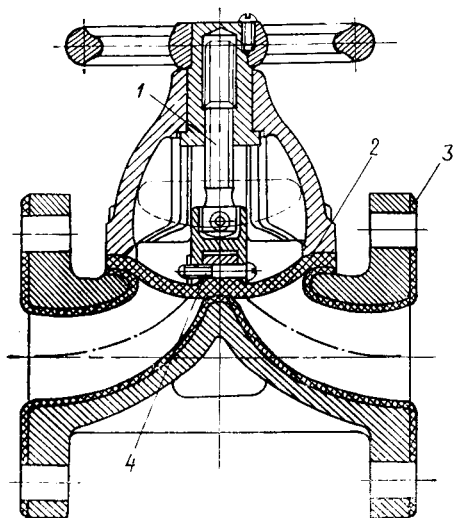


Рис. 236. Диафрагмовый вентиль:  
1 — шпиндель; 2 — диафрагма; 3 — защитный  
слой; 4 — соединительная шпилька

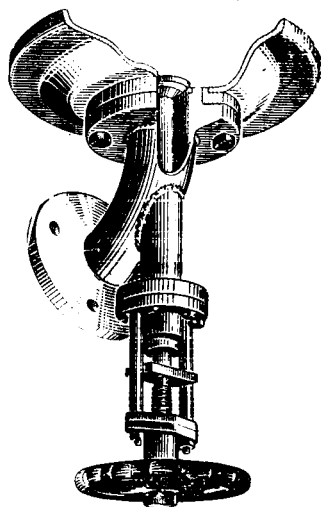


Рис. 237. Вентиль нижнего  
спуска

в последнем случае служит резиновая мембрана, связанная со шпинделем. На рис. 237 показан ventиль нижнего спуска, применяемый при выгрузке вязких продуктов из аппаратов. Клапан его открывается внутрь аппарата, что позволяет сделать ventиль более компактным.

Вентили конструируют и устанавливают так, чтобы движение среды происходило «под клапан», обратное направление нежелательно. Обычно на корпусе ventиля имеется стрелка, показывающая нормальное направление движения среды.

Наиболее ответственная часть ventиля — узел уплотнения. Уплотнительные поверхности (рис. 238) могут быть выполнены в зависимости от условий работы из стали, цветных металлов, пластмасс, кожи или резины. В уплотнении участвуют две детали — клапан 5 (см. рис. 233) и седло клапана 6, представляющее собой

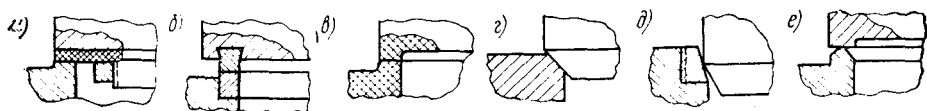


Рис. 238. Типы уплотнительных поверхностей ventилей:

*а* — плоская прокладка из мягких материалов; *б* — кольцо, запрессованное в клапан; *в* — уплотнительные поверхности, выполненные из пластмасс; *г* — конусное уплотнение по поверхности; *д* — конусное линейное уплотнение; *е* — ножевое уплотнение

кольцо, запрессованное в корпус или просто кольцевую поверхность, обработанную на корпусе. Обычно седло выполняют из более твердого материала. По форме уплотнительных поверхностей различают плоское, конусное кольцевое (с касанием по площади), конусное (*д*), линейное (с касанием по кольцевой линии) и ножевое (*е*) уплотнение. Уплотнение с плоскими прокладками (*а*) из кожи, резины и мягкого пластика применяют для воды, воздуха и других нейтральных сред при давлении до  $1,0 \text{ Н/мм}^2$  и сравнительно невысоких температурах. В данных конструкциях седло клапана изготовляют обычно из бронзы или латуни, а мягкую прокладку крепят к седлу клапана. Уплотнения из пластмассовых или гуммированных деталей применяют при работе с коррозионными средами. Для пара используют уплотнения с кольцами из стали и медных сплавов.

Конусные уплотнения (*г*) употребляют обычно для арматуры высоких давлений, ножевые — для вязких жидкостей и сред со взвешенными частицами. Уплотнительные поверхности тщательно обрабатывают и притирают.

**Краны.** Они имеют коническую притертую пробку со сквозным отверстием. При повороте пробки кран закрывается. По способу прижима пробки к гнезду различают сальниковые и натяжные краны. В сальниковых (рис. 239) имеется крышка, затягивающая сальниковую набивку и одновременно прижимающая пробку к гнезду. Сальник обеспечивает уплотнение в месте выхода оси пробки. В натяжных кранах уплотнение обеспечивается затяжкой гайки на конце

пробки. Натяжные краны не обеспечивают хорошей герметичности, поэтому их применяют только при низких давлениях на линиях малого диаметра. Наряду с обычными проходными кранами применяют трехходовые, позволяющие соединить между собой попарно любые из трех линий, присоединяемых к ним. Для передачи застывающих и кристаллизующихся продуктов применяют краны с обогревом. Краны изготовляют из бронзы или чугуна. Они рассчитаны на давление до  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ . Для химически активных сред применяют краны из алюминия и чугуны, защищенные феолимом или резиной. Имеются краны из кислотостойкой стали с фторопластовой пробкой. На линиях стеклянного или керамикового трубопровода

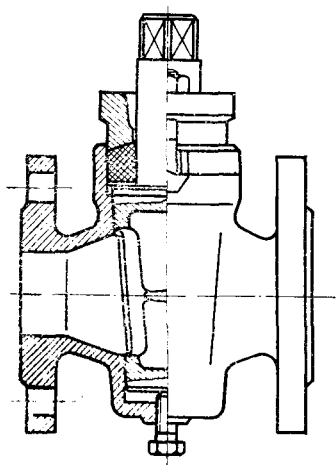


Рис. 239. Пробковый кран

применяют стеклянные и керамиковые краны. На выступающем конце пробки крана должна быть полоса (риска), совпадающая по направлению с отверстием в пробке, что дает возможность определить — открыт кран или закрыт. В настоящее время начали применять краны с шаровой пробкой. Преимущества кранов — малое гидравлическое сопротивление, возможность прочистки трубопровода через открытый кран. Недостатки — плохая герметичность, особенно при повышенных давлениях, и трудность регулирования расхода жидкости. При повороте пробки проход перекрывается мгновенно, что может быть причиной гидравлического удара на линиях, где жидкость движется с большей скоростью. Поэтому,

например, краны на водопроводах устанавливать нельзя. Их применяют на линиях сжатого воздуха, вакуума, кислот, щелочей и при транспортировании вязких, сильно загрязненных и кристаллизующихся жидкостей.

**Задвижки.** Их используют для трубопроводов диаметром от 50 до 2000 мм. Перекрытие в задвижках осуществляется за счет диска, перегораживающего поток. Задвижки имеют малое гидравлическое сопротивление, поэтому их применяют в основном на магистральных линиях воды, газа, сжатого воздуха и нефтепродуктов. На продуктовых трубопроводах химической промышленности их применяют редко. Недостатки задвижек — громоздкость, сложность антикоррозионной защиты, трудность обработки уплотняющих поверхностей. Задвижки разделяют на параллельные и клиновые (рис. 240). В клиновых задвижках уплотняющие кольца корпуса расположены под углом, диск имеет форму клина и при закрытии плотно прижимается к кольцам. В параллельных задвижках уплотнительные кольца расположены параллельно, а диск состоит из двух тарелок, между которыми помещается клин. При опускании диска клин распирает тарелки и прижимает их к уплотняющим

кольцам. Задвижки изготавливают из чугуна, стали и цветных металлов. Если они имеют большой диаметр и малые давления, то их делают сварными. Поперечное сечение корпуса задвижки может иметь вид прямоугольника, овала или круга. Для увеличения жесткости корпуса больших задвижек снабжают ребрами.

**Регулирующая арматура.** С ее помощью поддерживаются в заданных пределах параметры технологического процесса. Обычно такая арматура является составной частью схем автоматического регулирования, но иногда она работает как самостоятельное устройство. Регулирование может быть ручным и автоматическим. Для ручного регулирования применяют регулирующие дроссельные ventили, для автоматического — клапаны, связанные с различными элементами автоматического управления. Основным элементом регулятора — плунжер, при подъеме которого изменяется сечение для прохода среды.

Предохранительные клапаны служат для предотвращения недопустимого повышения давления в аппаратах и трубопроводах. При повышении давления сверх установленной нормы клапан открывается и сбрасывает часть пара (или газа) в атмосферу или в специальную выхлопную линию. Поскольку поступление рабочей среды в аппарат не прекращается, пропускная способность клапана должна быть не меньше возможного поступления среды. В зависимости от способа уравнивания давления различают клапаны рычажные (грузовые) и пружинные.

Клапаны подразделяют в зависимости от количества тарелок на одинарные и двойные, от высоты подъема — на малоподъемные, у которых высота подъема тарелки  $\geq 0,05$  диаметра седла, и полноподъемные, имеющие высоту подъема  $> 0,25$  диаметра седла. Малоподъемные клапаны применяют в тех случаях, когда безопасность работы установки обеспечивается небольшими количествами сбрасываемой среды; полноподъемные — в более ответственных случаях, когда обеспечивают большой сброс среды. Пружинные клапаны более компактны по сравнению с грузовыми, однако усилие пружины (а следовательно, и настройка клапана) могут со временем изменяться, поэтому грузовой клапан более надежен.

В зависимости от конструкции корпуса предохранительные клапаны могут быть герметичными и открытыми. В герметичных кла-

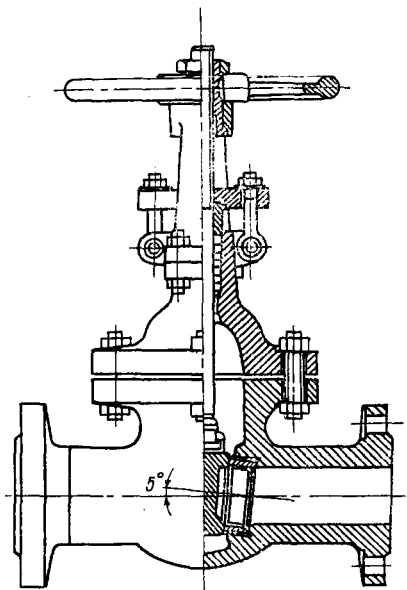


Рис. 240. Клиновая задвижка

панах сбрасываемая среда отводится в специальный трубопровод. Такие клапаны применяются для ядовитых и взрывоопасных сред. В открытых клапанах среда сбрасывается наружу. Их применяют для работы с безопасными средами (паром, сжатым воздухом и др.).

На рис. 241 показан пружинный предохранительный клапан. Усилие пружины действует на шток, связанный с тарелкой клапана.

Натяжение пружины регулируется с помощью гайки. Клапан имеет рукоятку для принудительного открытия, которое проводят периодически для проверки его работы. Нагруженный рабочим давлением, он должен открываться под действием незначительного усилия. В грузовом клапане (рис. 242) усилие на тарел-

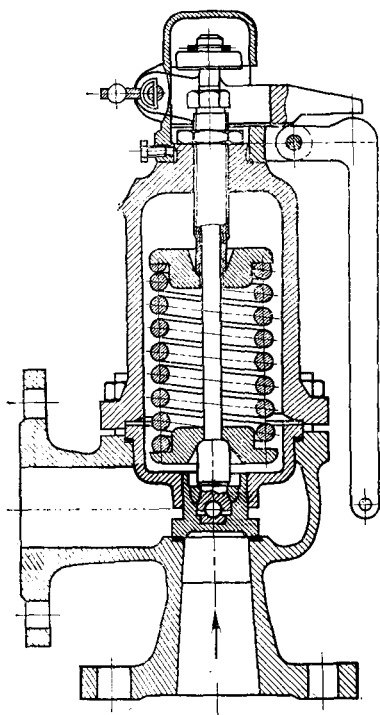


Рис. 241. Пружинный предохранительный клапан

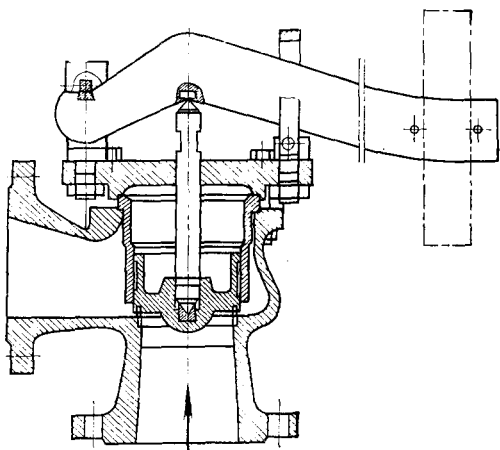


Рис. 242. Грузовой предохранительный клапан

ку передается с помощью груза, закрепленного на конце рычага. Всю рычажно-грузовую систему помещают в закрытый кожух, исключающий возможность изменения регулировки.

Обратные клапаны служат для пропуска среды в одном направлении. В зависимости от принципа действия различают клапаны, закрывающиеся за счет веса тарелки (рис. 243, а), и с пружинным прижимом. Закрывающийся за счет веса тарелки может быть установлен только на горизонтальных участках трубопроводов. Работа пружинного клапана не зависит от его расположения. Клапан-захлопка (рис. 243, б) имеет тарелку, поворачивающуюся на петлях.

Наряду с перечисленными основными типами трубопроводной арматуры необходимо отметить некоторые виды специальной: ука-

затели уровня, пробно-спускные краны, конденсатоотводчики, редукционные клапаны, смотровые фонари и др.

Указатели уровня применяют для наблюдения за уровнем жидкости в резервуарах и сосудах. На рис. 244 показан общий вид ука-

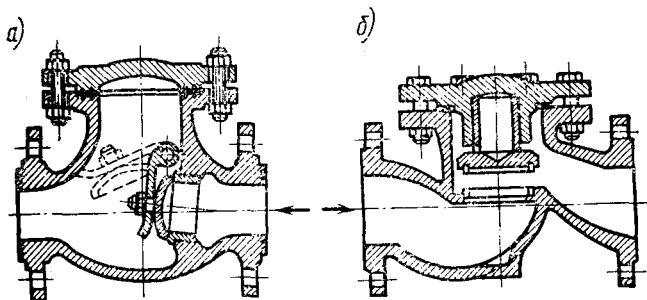


Рис. 243. Обратные клапаны:

а — закрывающийся за счет веса тарелки; б — клапан-захлопка

зателя уровня с водомерным стеклом. Нижний кран уровня служит также и пробно-спускным краном. Для повышенных давлений применяют рамочные указатели с плоским водомерным стеклом. Пробно-спускные краны служат для проверки наличия жидкости в резервуарах и сосудах. Конденсатоотводчики (конденсационные горшки) устанавливают на отводных линиях из теплообменников и calorifiers, обогреваемых паром. Их назначение — пропускать образующийся конденсат и не пропускать пар. Они работают при различном режиме давлений и температур, и их действие основано на различных физических законах. Простейшее устройство для отвода конденсата — гидравлический затвор. Высота затвора должна быть больше давления пара, выраженного в миллиметрах водяного столба. Гидравлический затвор целесообразно применять только для малых давлений, так как при давлении  $0,1 \text{ Н/м}^2$  высота затвора составит 10 м. Конденсатоотводчики — наиболее распространенные устройства для отвода конденсата. В зависимости от конструкции различают конденсатоотводчики с открытым поплавком и закрытым поплавком и термостатического типа. Конденсационные горшки не должны пропускать пар и быть нечувствительными к колебаниям давления. На рис. 245 показан конденсатоотводчик с открытым поплавком. Клапан, запирающий выходное отверстие, соединяется с поплавком в виде стакана. Когда конденсат попадает в горшок, по-

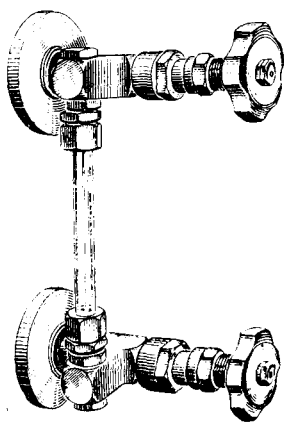


Рис. 244. Указатель уровня

плавок всплывает и запирает выходное отверстие. При наполнении горшка конденсат переливается в стакан поплавка и топит его, выходное отверстие при этом открывается и часть конденсата за счет давления пара выбрасывается из горшка. По мере опорожнения стакана он снова всплывает и клапан закрывает отверстие. Один из простейших конденсатоотводчиков — подпорная шайба, представляющая собой стальной или бронзовый диск толщиной  $3\div 5$  мм с отверстием в центре. Диаметр отверстия подбирают по соответствующим таблицам в зависимости от расхода конденсата и перепада давления. При правильном выборе размера отверстия через него прорывается вместе с конденсатом не более  $1\div 3\%$  пара.

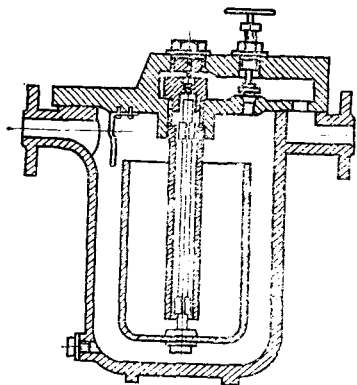


Рис. 245. Конденсатоотводчик с открытым поплавком

**Редукционные клапаны.** Служат для снижения давления среды и поддержания после себя постоянного давления.

**Приводная трубопроводная арматура.** Ее комплектуют ручным и механизированным приводом. Ручное управление в простейшем случае осуществляется с помощью маховика, закрепленного непосредственно на шпинделе или ходовой гайке. Во многих случаях для управления арматурой необходимы значительные крутящие моменты на шпинделе. Чтобы уменьшить усилие на рукоятке маховика, применяют редукторы с зубчатой или червячной передачей с передаточным отношением  $3\div 15$ . Тихоходное колесо редуктора

передает вращение на шпиндель вентиля или задвижки.

При установке арматуры в местах, недоступных для обслуживающего персонала, применяют дистанционное управление, осуществляемое обычно с помощью валов, соединенных шарнирами Гука. Валы передачи располагаются таким образом, чтобы угол между ними не превышал  $30^\circ$ . В качестве механизированного привода применяют электро-, пневмо- и гидропривод.

Электроприводы, как правило, имеют небольшие габариты. Лишь для арматуры малых проходов они получаются относительно громоздкими. Электродвигатель связан со шпинделем арматуры через зубчатую планетарную или червячную передачу. Привод имеет муфту ограничения крутящего момента, предохраняющую двигатель от перегрузок, концевые выключатели и указатель высоты подъема шпинделя, а также штурвал, обеспечивающий в случае необходимости ручное управление.

Пневматический и гидравлический приводы в свою очередь разделяют на поршневые и мембранные. Поршневой используют на многих производствах для управления задвижками и вентилями. Многие конструкции арматуры с ручным управлением могут быть сравнительно просто переоборудованы на управление с помощью

поршневого привода. В трубопроводной арматуре широко распространены мембранный привод с мембраной, изготовленный из резины толщиной 2÷4 мм (рис. 246). Передача усилия с мембраны на шток осуществляется с помощью диска или грибка, образующего для мембраны опорную плоскость. Мембранный привод бывает как одностороннего, так и двустороннего действия. Для управления этими приводами применяют сжатый воздух давлением 0,02÷0,1 Н/мм<sup>2</sup>. Благодаря большому диаметру мембраны (расчетный диаметр доходит до 500 мм) даже при таком небольшом давлении воздуха есть возможность получить значительные усилия на штоке.

## § 15.2. Расчет трубопроводной арматуры

Расчет трубопроводной арматуры складывается из расчетов гидравлического, силового и прочностного. Гидравлический заключается в определении гидравлических сопротивлений при движении среды через арматуру. Силовой служит для определения усилий и моментов, необходимых для управления арматурой.

Расчет вентиля. Силовой расчет вентиля начинают с определения осевого усилия, действующего на клапан. Наибольшее осевое усилие

$$Q = Q_d + Q_{упл}, \quad (151)$$

где  $Q_d$  — сила давления на клапан;  $Q_{упл}$  — усилие, необходимое для уплотнения клапана.

Если среда движется под клапан, то над ним давление отсутствует:  $Q_d = (\pi/4) D_{ср}^2 p$ , где  $D_{ср}$  — средний диаметр уплотнительной поверхности, мм;  $p$  — давление, Н/мм<sup>2</sup>.

Для плоской уплотнительной поверхности усилие уплотнения  $Q_{упл} = qF = q(\pi/4)(D_{вн}^2 - D_{вн}^2)$ , где  $q$  — удельное давление, необходимое для уплотнения клапана, Н/мм<sup>2</sup>;  $F$  — площадь кольца уплотнения, мм<sup>2</sup>;  $D_{вн}$ ,  $D_{вн}$  — соответственно внешний и внутренний диаметр кольца уплотнения, мм.

Величина необходимого удельного давления зависит от давления рабочей среды, материала уплотнительных поверхностей, качества их обработки, ширины уплотнительной поверхности. Для определения величины  $q$  используют эмпирическую формулу

$$q = (0,1c + kp) \sqrt{0,1b},$$

где  $p$  — давление, Н/мм<sup>2</sup>;  $b$  — ширина кольца уплотнения, мм;  $c$  и  $k$  — эмпирические коэффициенты, определяемые по табл. 21.

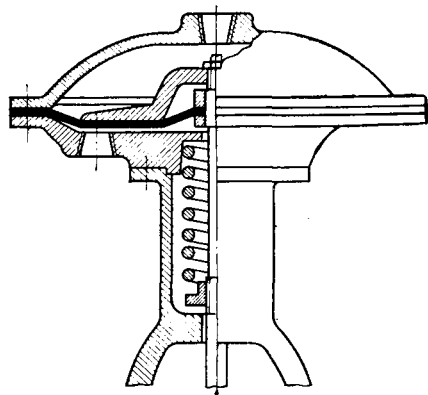


Рис. 246. Мембранный привод трубопроводной арматуры

| Материал уплотнения                                   | $c$ | $k$ |
|-------------------------------------------------------|-----|-----|
| Сталь и твердые сплавы                                | 35  | 1   |
| Чугун, бронза, латунь                                 | 30  | 1   |
| Алюминий и его сплавы:                                |     |     |
| полиэтилен, винипласт                                 | 18  | 0,9 |
| Резина средней твердости, полихлорвиниловый пластикат | 4   | 0,6 |

В ответственной арматуре, предназначенной для ядовитых и текучих сред, рекомендуется величину удельного давления увеличивать в  $1,5 \div 1,8$  раза. Чтобы фактические удельные давления не вызывали бы значительных пластических деформаций, они не должны превышать некоторой предельно допустимой величины:

для конической уплотнительной поверхности

$$Q_{\text{упл}} = q (\pi/4) (D_{\text{в}}^2 - D_{\text{вн}}^2) n,$$

где  $n = 1 + \mu/\text{tg } \varphi$ ;  $\varphi$  — угол между осью и образующей конуса;  $\mu$  — коэффициент трения. Принимая  $\mu = 0,3$ , получим:

|                   |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|
| $\varphi$ . . . . | 30° | 45° | 60° |
| $n$ . . . .       | 1,5 | 1,3 | 1,2 |

В клапанах с линейным контактом  $Q_{\text{упл}} = \pi D_{\text{к}} q_l$ , где  $D_{\text{к}}$  — диаметр линии контакта;  $q_l$  — единица длины контакта (при давлении среды  $p \leq 2,5 \text{ Н/мм}^2$ ), определяемая по табл. 22;

Таблица 22

| Материал мягкого уплотняющего кольца | $q_l$       |
|--------------------------------------|-------------|
| Мягкая резина и пластикат            | $0,4 + 6p$  |
| Фторопласт и полиэтилен              | $1,0 + 10p$ |
| Баббит                               | $5,0 + 12p$ |

Примечание. Размерность давления  $p$  принята в ньютонах на  $1 \text{ мм}^2$ .

при линейном конусном уплотнении (см. рис. 238)  $Q_{\text{упл}} = \pi D_{\text{к}} q_l n \sin \varphi$ .

Крутящий момент, необходимый для закрытия вентиля,

$$M_{\text{кр}} = A Q (d_{\text{ср}}/2) \text{tg} (\alpha + \rho), \quad (152)$$

где  $A$  — коэффициент, учитывающий повышение мощности за счет трения в сальнике;  $d_{\text{ср}}$  — средний диаметр резьбы шпинделя, мм;  $\alpha$  — угол подъема резьбы;  $\rho$  — угол трения.

Для упрощения расчетов в работе [45] приведена таблица значений произведения  $0,5 d_{\text{ср}} \text{tg} (\alpha + \rho)$  для резьб различного диаметра.

Коэффициент  $A = A_1 A_2$ , где  $A_1 = 1,1$  для  $d_y$  до 25 мм;  $A_1 = 1,0$  для  $d_y > 25$  мм; множитель  $A_2$ , зависящий от давления, имеет следующие значения:

|                                   |      |      |      |      |      |     |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|-----|
| Давление среды, Н/мм <sup>2</sup> | 0,6  | 1    | 1,6  | 2,5  | 4    | 6,4 |
| Коэффициент $A_2$ . . . . .       | 1,03 | 1,05 | 1,06 | 1,01 | 1,16 | 1,2 |

Окружное усилие на маховике

$$P = 2M/D_m, \quad (153)$$

где  $D_m$  — диаметр маховика, мм (см).

Для выбора размера маховика можно воспользоваться графиком, приведенным на рис. 247. Он показывает величину усилия, которое может быть приложено к маховику в зависимости от его диаметра человеком со средними физическими данными.

При силовом расчете пробкового крана определяется максимальный момент на оси пробки, необходимый для ее поворота. В сальниковых кранах наибольший момент (в конце закрывания)

$$M = M_k + M_c + M_p, \quad (154)$$

где  $M_k$  — момент от уплотнения в конусе;  $M_c$  — момент в сальнике;  $M_p$  — дополнительный расчетный момент за счет давления среды на закрытую пробку.

Момент от уплотнения в корпусе

$$M_k = Q D_{cp} \mu / [2 \sin \varphi (1 + \mu / \tan \varphi)],$$

где  $Q$  — осевое уплотнение на пробку;  $D_{cp} = (D_v + D_{вн})/2$  — средний диаметр пробки.

Осевое усилие, необходимое для обеспечения плотности крана,

$$Q = \pi D_{cp} b q (1 + \mu / \tan \varphi),$$

где  $b = (D_v - D_{вн})/2$ ;  $q = 0,06 p^2$  — удельное давление на конусной поверхности;  $p$  — давление, Н/мм<sup>2</sup>.

Расчетный момент от действия давления среды

$$M_p = p f (D_{cp}^2 / 2) \mu,$$

где  $f$  — площадь отверстия корпуса, перекрытая пробкой.

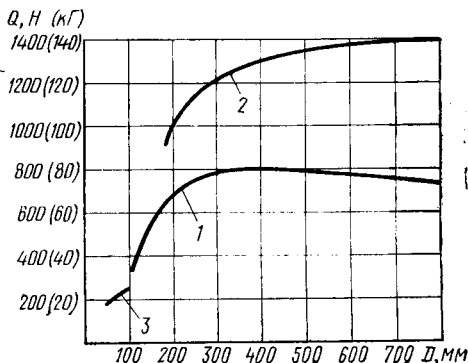


Рис. 247. Диаграмма наибольших усилий, которые может приложить человек со средними физическими данными к маховикам разных диаметров:

1 — один человек двумя руками; 2 — два человека; 3 — один человек одной рукой

Расчет предохранительного клапана. Усилие, действующее на тарелку предохранительного клапана,

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{упл.}} \quad (155)$$

Клапан поднимается под действием давления среды, преодолевающим не только усилие  $Q_{\text{л}}$ , но и дополнительное усилие  $Q_{\text{упл.}}$ , прилагаемое к тарелке клапана для обеспечения его плотности. Следовательно, фактическое давление, приводящее в действие предохранительный клапан, будет на какую-то величину  $\Delta p$  больше рабочего давления  $p_{\text{раб}}$ . Эта величина характеризует чувствительность клапана и будет тем меньше, чем больше величина  $\Delta p$ . Для увеличения чувствительности клапана уплотнительной поверхности повышают чистоту ее обработки.

### § 15.3. Выбор и эксплуатация трубопроводной арматуры

Трубопроводную арматуру выбирают по каталогам. На корпусе арматуры обозначается условный диаметр прохода и рабочее давление, а также ставится условный индекс, указывающий тип арматуры и ее основные данные. Арматура должна использоваться строго по назначению в соответствии с техническими характеристиками. Например, не допускается использовать запорную арматуру в качестве регулирующей или дроссельной, так как дроссельная работает в условиях значительных перепадов давлений и в ней образуются значительные скорости потоков, что вызывает вибрации клапанов, дисков и других дросселирующих элементов. Арматура должна устанавливаться на трубопроводе так, чтобы направление движения среды совпадало с направлением стрелки на корпусе. Перед установкой арматуры трубопровод должен быть тщательно промыт и очищен от песка, грязи, окалины, потому что попадание твердых частиц на уплотнительные поверхности выводит их из строя.

У каждого штурвала или рукоятки должны быть сделаны достаточно четкие надписи с указанием назначения арматуры.

На наиболее ответственных линиях арматуру периодически осматривают, результаты фиксируют в специальном журнале. Обнаруженные течи в прокладках, сальниках, резьбовых соединениях должны быть своевременно ликвидированы. Резьбу шпинделей смазывают не реже одного раза в месяц.

Ответственные элементы арматуры периодически проверяются на готовность к действию. Так, в предохранительных клапанах периодически поднимают тарелки во избежание их «прикипания» к седлу. При ручном управлении не допускается применение добавочных рычагов. Вентили и задвижки больших диаметров (особенно на магистральных паровых линиях) должны открываться и закрываться медленно, так как быстрые открывание и закрывание могут вызвать гидравлические удары в трубопроводах.

Арматура подвергается гидравлическому испытанию на заводе-изготовителе и после монтажа совместно с трубопроводом.

1. Бабницкий И. Ф., Вихман Г. Л., Вольфсон С. М. Расчет и конструирование аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов. «Недра», 1965.
2. Домашнев А. Д. Конструирование и расчет химических аппаратов. Машгиз, 1961.
3. Лашинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. «Машиностроение», 1970.
4. Александров И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. «Химия», 1965.
5. Бахшинян И. А. Трубчатые печи с излучающими стенками. ГОСИНТИ, 1960.
6. Барановский Н. В. Пластинчатые и спиральные теплообменники. «Машиностроение», 1973.
7. Головачевский Ю. А. Оросители и форсунки скрубберов химического машиностроения. «Химия», 1973.
8. Гельперин Н. И. Основы техники псевдооживления. «Химия», 1967.
9. Голубев А. М. Уплотнение вращающихся валов. «Химия», 1973.
10. Долинин Н. П. Нагревательные элементы реакционных аппаратов. «Машиностроение», 1967.
11. Дерешкевич Ю. В. Кислотоупорные сооружения в химической промышленности. Госхимиздат, 1960.
12. Каневский Л. С. Углеродистая теплообменная аппаратура. М. 1969.
13. Канторович З. Б. Машины химической промышленности. «Машиностроение», 1965.
14. Канторович З. Б. Основы расчета химических машин и аппаратов. Машгиз, 1960.
15. Кардашев Г. А., Михайлов П. Е. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. «Машиностроение», 1973.
16. Лукьяненко В. М., Таранец А. В. Промышленные центрифуги. «Химия», 1974.
17. Пульсационная химическая аппаратура. Цинтихимнефтемаш, 1969.
18. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. «Химия», 1968.
19. Соколов В. И. Современные промышленные центрифуги. «Машиностроение», 1967.
20. Стабников В. Н. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов. «Техника», 1970.
21. Чернобыльский И. И. Машины и аппараты химической промышленности. Машгиз, 1962.
22. Черноусов Н. П. Герметичные машины и аппараты химической технологии. «Машиностроение», 1965.
23. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. «Металлургия», 1974.
24. ГОСТ 14249—73. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность».
25. ОСТ 26-1046—74 «Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность».
26. ОСТ 26-373—71 «Нормы расчета и конструирования фланцевых соединений».
27. ОСТ 26-01-270—71 «Сосуды и аппараты из титана. Нормы и методы расчета на прочность».

28. ОСТ 26-01-102—70 «Сосуды и аппараты. Нормы расчета на прочность. Правочные коэффициенты к нормативным допускаемым напряжениям».
29. ОСТ 26-711—73 «Сосуды и аппараты. Расчет укрепления отверстий в обечайках, переходах и днищах».
30. ОСТ 26-487—72 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчетные усилия от ветровой нагрузки и сейсмических воздействий».
31. ОСТ 26-291—71 «Сосуды и аппараты сварные, стальные. Технические требования».
32. Идельчик И. Е. Аэродинамика промышленных аппаратов. «Энергия», 1964.
33. Амелин А. Г. Производство серной кислоты. «Химия», 1967.
34. Андреев Ф. А. Технология связанного азота. «Химия», 1960.
35. Атрощенко В. И. Курс технологии связанного азота. «Химия», 1969.
36. Боресков Г. К. Катализ в производстве серной кислоты. Госхимиздат, 1954.
37. Ганз С. Н. Технологические процессы и оборудование производства синтез газа и связанного азота. Изд-во Харьковского университета, 1960.
38. Катализ в кипящем слое /Под ред. И. П. Мухленова. «Химия», 1971.
39. Позин М. Е. Технология минеральных удобрений. «Химия», 1974.
40. Плановский А. Н., Гуревич Д. А. Аппаратура промышленности полупродуктов и красителей. Госхимиздат, 1961.
41. Румянцев О. В. Оборудование цехов синтеза высокого давления в азотной промышленности. «Химия», 1970.
42. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. Госхимиздат, 1957.
43. Бакланов Н. А. Трубопроводы в химической промышленности. Госхимиздат, 1953.
44. Иванов Е. А., Шепелев А. В., Лялин Г. В. Трубопроводы в химической промышленности, 1963.
45. Гуревич Д. Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. «Машиностроение», 1964.
46. Ряполов А. В. Технологические трубопроводы высокого давления. Госстройиздат, 1962.

|                       | Стр. |
|-----------------------|------|
| Предисловие . . . . . | 3    |
| Введение . . . . .    | 4    |

## Часть I

### Основные аппараты для физико-химических процессов

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 1. Основные правила конструирования химических аппаратов и машин . . . . .                   | 8   |
| § 1.1. Основные требования, предъявляемые к химическому оборудованию . . . . .                     | 8   |
| § 1.2. Материалы химического машиностроения и способы изготовления аппаратуры . . . . .            | 14  |
| § 1.3. Испытание химических аппаратов и машин и основные требования техники безопасности . . . . . | 28  |
| § 1.4. Стандартизация в химическом машиностроении . . . . .                                        | 31  |
| Глава 2. Конструирование и расчет основных узлов и деталей химических машин и аппаратов . . . . .  | 32  |
| § 2.1. Некоторые теоретические основы расчета на прочность сосудов и аппаратов . . . . .           | 32  |
| § 2.2. Выбор исходных данных для инженерного расчета . . . . .                                     | 35  |
| § 2.3. Конструирование и расчет обечаек . . . . .                                                  | 39  |
| § 2.4. Днища и крышки аппаратов . . . . .                                                          | 44  |
| § 2.5. Фланцевые соединения . . . . .                                                              | 46  |
| § 2.6. Устройства для присоединения трубопроводов и осмотра фланцев . . . . .                      | 65  |
| § 2.7. Опоры аппаратов и устройства для строповки . . . . .                                        | 72  |
| Глава 3. Теплообменные аппараты и устройства . . . . .                                             | 80  |
| § 3.1. Основные принципы конструирования теплообменных аппаратов . . . . .                         | 80  |
| § 3.2. Кожухотрубные теплообменники . . . . .                                                      | 82  |
| § 3.3. Расчет кожухотрубных теплообменников . . . . .                                              | 92  |
| § 3.4. Змеевиковые, спиральные и блочные теплообменники . . . . .                                  | 98  |
| § 3.5. Теплообменные устройства аппаратов . . . . .                                                | 103 |
| Глава 4. Резервуары и вспомогательная емкостная аппаратура . . . . .                               | 109 |
| § 4.1. Резервуары . . . . .                                                                        | 109 |
| § 4.2. Вспомогательная емкостная аппаратура . . . . .                                              | 114 |
| § 4.3. Расчет резервуаров на прочность . . . . .                                                   | 114 |
| Глава 5. Аппараты высокого давления . . . . .                                                      | 119 |
| § 5.1. Устройство и изготовление корпусов аппаратов . . . . .                                      | 119 |
| § 5.2. Затворы и уплотнения аппаратов высокого давления . . . . .                                  | 122 |
| § 5.3. Расчет аппаратов высокого давления . . . . .                                                | 125 |
| Глава 6. Колонные и башенные аппараты . . . . .                                                    | 130 |
| § 6.1. Классификация колонных и башенных аппаратов . . . . .                                       | 130 |
| § 6.2. Тарельчатые колонны . . . . .                                                               | 132 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 6.3. Насадочные колонны . . . . .                                                              | 139 |
| § 6.4. Колонны специальных типов . . . . .                                                       | 147 |
| § 6.5. Расчет колонных аппаратов . . . . .                                                       | 148 |
| Глава 7. Аппараты для химических и физико-химических процессов в твердой фазе . . . . .          | 158 |
| § 7.1. Классификация машин и аппаратов для обработки твердых и пастообразных продуктов . . . . . | 158 |
| § 7.2. Вращающиеся барабанные аппараты . . . . .                                                 | 160 |
| § 7.3. Аппараты с псевдоожиженным слоем . . . . .                                                | 166 |
| § 7.4. Аппараты с перемешивающими лопастями . . . . .                                            | 171 |
| Глава 8. Центрифуги . . . . .                                                                    | 176 |
| § 8.1. Основные типы центрифуг . . . . .                                                         | 176 |
| § 8.2. Центрифуги с вертикальным валом . . . . .                                                 | 177 |
| § 8.3. Горизонтальные и трубчатые центрифуги . . . . .                                           | 181 |
| § 8.4. Расчет центрифуг . . . . .                                                                | 186 |
| Глава 9. Ультразвуковая и пульсационная аппаратура . . . . .                                     | 188 |

## Часть 2

### Реакционная аппаратура

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 10. Аппараты для контактно-каталитических и высокотемпературных процессов в газовой фазе . . . . . | 192 |
| § 10.1. Классификация реакционных аппаратов . . . . .                                                    | 192 |
| § 10.2. Контактные аппараты с неподвижным слоем катализатора . . . . .                                   | 193 |
| § 10.3. Контактные аппараты с псевдоожиженным катализатором . . . . .                                    | 204 |
| § 10.4. Аппаратура для высокотемпературных процессов . . . . .                                           | 206 |
| Глава 11. Емкостная реакционная аппаратура . . . . .                                                     | 213 |
| § 11.1. Основные типы емкостных реакционных аппаратов . . . . .                                          | 213 |
| § 11.2. Перемешивающие устройства . . . . .                                                              | 216 |
| § 11.3. Приводы мешалок . . . . .                                                                        | 228 |
| § 11.4. Уплотнение вращающихся валов . . . . .                                                           | 232 |
| § 11.5. Аппараты с герметичным приводом . . . . .                                                        | 236 |
| Глава 12. Колонные реакционные аппараты для жидкофазных процессов . . . . .                              | 239 |
| Глава 13. Аппаратура для химических процессов в твердой фазе . . . . .                                   | 244 |

## Часть 3

### Трубопроводы в химической промышленности

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 14. Трубы и детали трубопроводов . . . . .                  | 249 |
| § 14.1. Трубы . . . . .                                           | 249 |
| § 14.2. Соединения трубопроводов и фасонные части к ним . . . . . | 252 |
| Глава 15. Трубопроводная арматура . . . . .                       | 255 |
| § 15.1. Конструирование арматуры . . . . .                        | 255 |
| § 15.2. Расчет трубопроводной арматуры . . . . .                  | 265 |
| § 15.3. Выбор и эксплуатация трубопроводной арматуры . . . . .    | 268 |
| Литература . . . . .                                              | 269 |